

AVALIAÇÃO DE TÉCNICA DE MEDIDA DO TEMPO DE PERCURSO DE
ONDAS ULTRASSÔNICAS BASEADO NO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

RAMIRO JOSÉ DA SILVA NETO

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear – ênfase acadêmica em Engenharia de Reatores.

Orientador: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc.

Rio de Janeiro

Março/2014

SILV da Silva Neto, Ramiro José

Avaliação de técnica de medida do tempo de percurso de ondas ultrassônicas baseado no espectro de frequência / Ramiro José da Silva Neto - Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2014

102 f.

Orientador: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) - Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2014

1. Constantes Elásticas. 2. Estado de tensão. 3. Domínio no tempo. 4. Domínio na frequência.

CDD
CDU

AVALIAÇÃO DE TÉCNICA DE MEDIDA DO TEMPO DE PERCURSO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS BASEADO NO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

Ramiro José da Silva Neto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE ACADÊMICA EM ENGENHARIA DE REATORES.

Aprovada por:

Prof. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc.
(Orientador)

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.
(PPGIEN, CNEN)

Dr. Orlando João Agostinho Gonçalves Filho, Ph.D.
(CNEN)

Profa. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.
(COPPE/PEMM/UFRJ)

Rio de Janeiro

Março/2014

DEDICATÓRIA

À Silvia Regina Alves dos Santos

Obrigado, mãe, por dedicar-se a formar meu caráter e a minha personalidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelos incentivos mais valorosos desde minha infância.

Aos avós e tios, meu profundo agradecimento, por dedicarem especial carinho e por investirem na minha educação, coroada neste trabalho acadêmico.

Aos amigos, eleitos irmãos, Jorge e Sandro, por estarem sempre vibrantes com minhas conquistas e por nunca esconderem a admiração por mim, e que aproveito para expressar minha reciprocidade.

A Hanz-Peter Salz, atualmente Tenente-Coronel da minha Força Aérea Brasileira, que por ocasião do meu ingresso neste programa de pós-graduação, na condição de chefe da subdivisão em que trabalho até hoje, acreditou no meu esforço e concedeu as muitas horas necessárias para que eu concretizasse este trabalho.

A Renata Oliveira da Silva, Tenente da Força Aérea Brasileira, que durante o curso neste programa de pós-graduação, na condição de minha chefe direta, abriu mão do protocolo formal e, por amizade e afinidade profissional, possibilitou que concluísse esta etapa de minha carreira, incentivando não só a mim, como a meu colegas a seguirem o caminho dos estudos. A ela, meu especial reconhecimento, gratidão e carinho.

A Kayse Santos Leitão, companheira e incentivadora, pela apresentação do instituto onde iniciara sua carreira profissional, que foi o local onde herdei muitos de seus amigos.

A mais recente, e não menos estimável, amiga verdadeira Ana Luiza Santos, a quem devo muitas linhas deste trabalho e de história de vida. A inspiração e a parceria são marcas da nossa convivência.

Por fim, quero expressar minha gratidão ao orientador D.Sc. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, a quem, com a licença, quero colocar junto em destaque o M.Sc. Douglas Brandão Baroni, amigo e contemporâneo na graduação. Juntos foram as mentes privilegiadas que nortearam este trabalho e que, sem dúvida, estarão comigo na continuação da minha carreira acadêmica.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

Resumo da Dissertação apresentada ao IEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DE TÉCNICA DE MEDIDA DO TEMPO DE PERCURSO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS BASEADO NO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

Ramiro José da Silva Neto

Março/2014

Orientador: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc.

Programa: Engenharia Nuclear

A caracterização de materiais feita com o apoio de técnicas não destrutivas tem grande importância em aplicações industriais. As técnicas ultrassônicas destacam-se pela boa resolução em medir pequenas variações de velocidades das ondas em decorrência das mudanças de características sofridas por um determinado material. De forma geral estas técnicas ultrassônicas são estudadas no domínio do tempo, o que representa dificuldade experimental quando são analisados materiais de espessura fina, bem como os que atenuam o sinal ultrassônico de forma drástica. Uma técnica ultrassônica que utiliza o domínio da frequência é testada neste trabalho com intuito de fornecer medidas de tempo para cálculo das constantes elásticas de segunda ordem de uma liga de alumínio e também para avaliar o estado de tensão decorrente de uma série de carregamentos mecânicos, situação física limítrofe onde ocorrem as menores variações de velocidades no material. Com auxílio de uma abordagem estatística foi possível ter bons resultados dos testes efetuados, onde a técnica de domínio na frequência diferiu no máximo 1% dos valores médios alcançados por uma técnica de domínio no tempo já bastante explorada em trabalhos produzidos no Laboratório de Ultrassom do Instituto de Engenharia Nuclear (LABUS/IEN), além de ter apresentado, na maior parte do conjunto de medidas, boa estabilidade e capacidade de diferenciação dos tempos na ordem de grandeza de nanossegundo, o que conferiu ao experimento boa precisão.

Palavras-chaves: 1. Constantes Elásticas. 2. Estado de Tensão. 3. Domínio no tempo. 4. Domínio na frequência

Abstract of Dissertation presented to IEN/CNEN as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TECHNICAL EVALUATION OF MEASURING TIME COURSE OF WAVES BASED
ULTRASONIC FREQUENCY SPECTRUM

Ramiro José da Silva Neto

March/2014

Advisor: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc

Program: Nuclear Engineering

The characterization of materials made with the support of non-destructive techniques has great importance in industrial applications. The ultrasonic techniques are distinguished by good resolution to measure small variations of wave velocities due to changes in characteristics experienced by a given material. Generally these ultrasonic techniques are studied in the time domain, which represents experimental difficulty when thin materials are analyzed, as well as materials that to attenuate the ultrasonic signal drastically. An ultrasonic technique which uses the frequency domain is used in this study with the aim of providing good time measurements to calculate the second-order elastic constants of an aluminum alloy and also to assess the state of tension due to sequence of mechanical loads, unsure physical situation of variations in the material speeds. With the aid of a statistical approach, it was possible to have good results of the tests, where the technique in frequency domain differed at maximum 1% of the average values achieved by a time-domain technique already well explored in works produced in the Laboratory of Ultrasound Institute of Nuclear Engineering (Labus/IEN), also presented in most of the set of measures, good stability and differentiation capacity of the times in the order of magnitude of nanoseconds, which has given good performance experiment .

Key-Words: 1. Elastic constants. 2. State Tension. 3. Time domain. 4. Frequency domain

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	1
1.3	OBJETIVO DA PESQUISA	2
1.4	ETAPAS DO TRABALHO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	ULTRASSOM.....	4
2.1.1	Princípios Físicos do Ultrassom.....	5
2.2	TRANSDUTORES	12
2.3	PROCESSAMENTO DE SINAIS DIGITAIS	13
2.3.1	Transformada de Fourier	13
2.3.2	F.F.T (Transformada Rápida de Fourier)	15
2.4	ULTRASSOM NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	19
2.5	ULTRASSOM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	21
2.5.1	Determinação do Δf	22
2.6	TENSÕES ATUANTES	24
2.6.1	Tensão Aplicada.....	24
2.6.2	Tensão Residual ou Interna	24
2.7	ASPECTOS BÁSICOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	26
2.8	TÉCNICAS DE MEDIDAS DE TEMPO.....	27
2.8.1	Método do Interferômetro	28
2.8.2	Método da Ressonância.....	29
2.8.3	Método "Sing-Around"	30
2.8.4	Método da Superposição de Pulso.....	31
2.8.5	Método Pulse-Echo-Overlap	32
2.9	ACUSTOELASTICIDADE E BIRREFRINGÊNCIA.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
3.2	MATERIAL	37
3.3	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO BLOCO	38

3.3.1 Etapa experimental.....	38
3.3.2. Cálculo do Peso Específico.....	38
3.4 DETERMINAÇÃO DA TÉCNICA DE TOMADA DE DADOS DOS TEMPOS DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA.	39
3.4.1 Método de captura do sinal par a par [14].....	39
3.4.2 Método de captura do sinal sequencial [14].....	39
3.4.3 Justificativa da escolha do método adequado.....	40
3.5 MEDIDA DOS TEMPOS DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA NO BLOCO DE ALUMÍNIO.....	41
3.5.1. Medida dos tempos de percurso da onda ultrassônica no bloco isento de carregamento....	43
3.5.2 Medida dos tempos de percurso da onda ultrassônica no bloco durante aplicação de carga	47
3.6 AVALIAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS EM COMPARAÇÃO AS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	48
3.7 AVALIAÇÃO DA TOMADA DE DADOS POR MÉTODO ESTATÍSTICO.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	51
4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO BLOCO DE ALUMÍNIO.....	51
4.3.1 Tempos de percurso das ondas ultrassônicas sem aplicação de carga	52
4.3.2 Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com aplicação de carga.....	53
4.4 DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS A PARTIR DE COMPARAÇÃO COM MODELO FÍSICO.....	55
4.5 DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS A PARTIR DE RECURSOS ESTATÍSTICOS	60
4.5.1 O software utilizado e seus recursos	60
4.5.2 Análise comparativa dos resultados	61
4.6 DISCUSSÃO SOBRE O COMPORTAMENTO FÍSICO DO BLOCO AO LONGO DO EXPERIMENTO.....	74
4.6.1 Comportamento da birrefringência acústica.....	74
4.6.2 Variação dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas em função da carga aplicada	77
5 CONCLUSÕES.....	81
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	84
ANEXO 01.....	87
ANEXO 02.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Espectro de frequências	6
Figura 02: Propagação da onda longitudinal.	8
Figura 03: Propagação da onda transversal.	9
Figura 04: Representação do transdutor	12
Figura 05: Custo computacional de N adições complexas	16
Figura 06: Decomposição do sinal com 16 pontos	17
Figura 07: Inversão de bits	18
Figura 08: Ganho computacional utilizando a FFT	19
Figura 09: Sinal adquirido pela técnica de pulso-eco no domínio do tempo com um transdutor de 5MHz em um metal com a espessura de 10mm	20
Figura 10: Sinal ultrassônico empacotado da pastilha (a) e sinal ultrassônico empacotado da chapa de alumínio (b)	21
Figura 11: Determinação dos Δf do sinal no domínio da frequência	22
Figura 12: Sinal ultrassônico no domínio do tempo.	23
Figura 13: Sinal ultrassônico no domínio da frequência.	23
Figura 14: Representação do sentido de aplicação da força no ensaio de compressão	28
Figura 15: Centros geométricos das faces do bloco de alumínio.	36
Figura 16: Aparato experimental	42
Figura 17: Aparato experimental	43

Figura 18: Posicionamento do cabeçote método de captura do sinal sequencial	44
Figura 19: Posicionamento do cabeçote a 90° método de captura do sinal sequencial	44
Figura 20: Sinal da onda ultrassônica com o domínio no tempo.	46
Figura 21: Sinal da onda ultrassônica com o domínio na frequência.	46
Figura 22: Leitura do sinal ultrassônico feita através da FFT.	47
Figura 23: Verificação do espaço percorrido pela onda ultrassônica. Bloco de alumínio A6351.	57
Figura 24: Verificação do espaço percorrido pela onda ultrassônica. Bloco de alumínio A6351.	58
Figura 25: Verificação do espaço percorrido pela onda ultrassônica. Bloco de alumínio A6351.	58
Figura 26: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento	62
Figura 27: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Sem Carregamento	63
Figura 28: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 30kN	64
Figura 29: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 30kN	65
Figura 30: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 35 kN	66
Figura 31: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 35 kN	67
Figura 32: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 40 kN	68
Figura 33: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 40 kN	69
Figura 34: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 45 kN	70
Figura 35: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 45 kN	71

Figura 36: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 50 kN	72
Figura 37: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 50 kN	73
Figura 38: Comportamento da birrefringência acústica - método da correlação cruzada (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)	75
Figura 39: Comportamento da birrefringência acústica - método da FFT	75
Figura 40: Comportamento da birrefringência acústica - método da correlação cruzada x método FFT	76
Figura 41: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste Linear	77
Figura 42: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste Linear, equações e coeficiente de correlação.	78
Figura 43: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste polinomial grau 2, equações e coeficiente de correlação.	79
Figura 44: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste polinomial grau 3, equações e coeficiente de correlação.	79
Figura 45: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste polinomial grau 4 equações e coeficiente de correlação.	80
Figura 46: Comparação dos tempos de percurso na face 1 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento	99
Figura 47: Comparação dos tempos de percurso na face 1 / Direção 2 - CC X FFT - Sem Carregamento	100
Figura 48: Comparação dos tempos de percurso na face 3 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento	101
Figura 49: Comparação dos tempos de percurso na face 3 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Propriedades acústicas dos materiais	10
Tabela 02: Propriedades mecânicas e físicas da liga A6351	37
Tabela 03: Variação das medidas de tempo de percurso	40
Tabela 04: Verificação das condições experimentais.	48
Tabela 05: Comportamento médio dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes.	52
Tabela 06: Comportamento médio das ondas ultrassônicas aplicadas ao bloco com carregamento.	54
Tabela 07: Tempos médios de percurso de onda longitudinal.	56
Tabela 08: Resultados das propriedades físicas obtidas com o método da correlação cruzada e FFT em comparação com a literatura.	59
Tabela 09: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 30kN	88
Tabela 10: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 35kN	89
Tabela 11: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 40kN	90
Tabela 12: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 45kN	91
Tabela 13: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 50 kN	92
Tabela 14: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado Face II /CC/ 30 kN	93
Tabela 15: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado Face II /CC/ 35 kN	94
Tabela 16: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado Face II /CC/ 40 kN	95
Tabela 17: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado Face II /CC/ 45 kN	96

Tabela 18: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado
Face II /CC/ 50 kN

97

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente o ultrassom é utilizado amplamente para inspeção e caracterização de materiais. Uma vez que alterações no material implicam na variação da velocidade da onda ultrassônica ao percorrer esse material, a busca por técnicas ultrassônicas de medida de tempo constitui área de grande interesse científico. Como as aplicações convencionais, tais como a localização e dimensionamento de descontinuidades, em geral, não requerem grande precisão dos valores das velocidades das ondas ultrassônicas em materiais, o Laboratório de Ultrassom do Instituto de Engenharia Nuclear (LABUS/IEN) tem como uma de suas principais linhas de pesquisa a criação e aplicação de técnicas ultrassônicas não convencionais de medida de tempo, que possibilitam cálculos precisos de velocidades e que podem ser aplicados aos mais variados tipos de situações de interesse experimental, tais como caracterização de materiais nas mais variadas propriedades físicas presentes neles.

Caracterizar materiais utilizando ondas ultrassônicas envolve, em muitos casos, ter disponibilidade de técnicas com níveis de resolução bastante altos, ou seja, capazes de medir intervalos de tempo tão pequenos quanto sejam possíveis para associá-lo às características analisadas.

1.2 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

No estudo de ondas ultrassônicas aplicadas à caracterização de materiais, os tempos de percurso dessas ondas são afetados de modo sensível e, à medida que são refinadas as técnicas de medida de tempo torna-se possível avaliar certas características (ou propriedades) do material a ser estudado, por exemplo, presença de defeitos, microestrutura, porosidade, constantes elásticas, estado de tensão mecânica etc.

A motivação deste trabalho vem da necessidade de técnicas de medidas de tempo com ondas ultrassônicas cada vez mais precisas e exatas para a caracterização de materiais que

sabidamente reagem de modo diferente aos tipos de onda empregada, fazendo variar o tempo de percurso destas ondas quando suas propriedades mudam.

Além disso, a técnica estudada possui algumas vantagens em relação à técnica convencional usada como referência, como por exemplo, a possibilidade ser aplicada em materiais laminados de baixa espessura e em materiais de alta impedância mecânica. Portanto, se confirmada sua aplicabilidade, pode vir a tornar-se uma forma mais efetiva de medida de tempo de percurso de ondas ultrassônicas permitindo a caracterização de um material até o seu estado de tensão.

Para cumprir o objetivo do trabalho, que é comparar duas técnicas ultrassônicas de medida de tempo, foi usada uma abordagem estatística, uma comparação com modelo físico de constantes elásticas e um ensaio de compressão para a análise de tensões no material dentro de seu regime elástico, situação de particular importância científica por se tratar das ocorrências de menores variações de tempo de percurso das ondas ultrassônicas e, portanto, ser a situação física onde há a maior necessidade de um sistema de medida de tempo com resolução cada vez maior.

A escolha do material levou em consideração suas características, como por exemplo, a alta resistência e o alto limite de escoamento, comparada à de muitos aços, com a vantagem do baixo peso. O comportamento favorável à passagem de uma onda ultrassônica (baixa impedância mecânica) também foi de fundamental importância.

Por fim, o fato de as ligas de alumínio ainda serem pouco exploradas em estudos semelhantes a este, dá maior base científica para aplicações futuras, ampliando a possibilidade de utilização deste material nos projetos mecânicos e estruturais nas indústrias.

1.3. OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho é avaliar a o uso de uma técnica de medidas de tempo de percurso de ondas ultrassônicas que possa fornecer resolução igual, ou melhor, à técnica disponível que usa sinal no domínio do tempo e análise com correlação cruzada chamada aqui de "Técnica da Correlação Cruzada". Neste estudo comparativo utilizou-se uma técnica baseada no domínio da frequência, que se vale do sinal ultrassônico (que normalmente é apresentado no domínio do tempo) transformado pela FFT (*Fast Fourier Transform*, ou em

português Transformada Rápida de Fourier) como técnica a ser validada, e aqui chamada de "Técnica da Frequência".

1.4 ETAPAS DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. O primeiro dedica-se a introduzir o tema escolhido, como também a mostrar a necessidade e a motivação da pesquisa desenvolvida. É explicada a razão da escolha da liga de alumínio como objeto de estudo, além de situar, de forma sucinta, o panorama da exploração deste tipo de material em estudos de técnicas ultrassônicas de medida de tempo.

Na revisão bibliográfica estão citados aspectos básicos da teoria do ultrassom. Nesta parte do texto também são detalhadas técnicas ultrassônicas de medida de tempo em materiais variados, mostrando o vasto campo de aplicação e aspectos da evolução da capacidade de resolução destas medidas. O objetivo principal desta revisão bibliográfica é compor, para fins informativos, um sumário de técnicas ultrassônicas de medidas de tempo do qual este estudo pretende fazer parte, colaborando com seus resultados experimentais.

A parte do texto reservada à descrição da metodologia aplicada e material utilizado mostra como foram compostas as etapas experimentais que deram base para este trabalho. Os dados coletados de medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas no bloco de alumínio foram usados na comparação com um modelo físico de análise de propriedades mecânicas envolvendo ultrassom, além de serem comparados com uma técnica de referência, utilizando abordagem estatística para dar base à comparação.

No capítulo 4, dedicado aos resultados e discussões, é mostrado, dentro da metodologia aplicada, como foi a efetividade dos experimentos. Também serão mostrados os gráficos e tabelas associados a estes resultados, bem como suas discussões.

Por fim, nos capítulos 5 e 6, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e são propostas sugestões para colaborações futuras nesta linha de pesquisa, ressaltando que a importância do tema não abrange apenas os objetivos do PPGIEN, mas da indústria como um todo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ULTRASSOM

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo, que se baseia na porção espectro acústico de alta frequência; as frequências audíveis pelos seres humanos estão entre 20Hz até 20kHz.

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que são originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e que, para se propagarem, necessitam de um meio material. Por isso, que as ondas mecânicas não se propagam no vácuo.

Tradicionalmente no ensaio de ultrassom, um emissor induz ondas ultrassônicas que se propagam através do material a ser analisado. Pelo eco captado no receptor, determina-se a existência ou não de descontinuidades. O ensaio de ultrassom é um dos principais métodos de ensaio não destrutivos aplicados na indústria, porque permite inspecionar todo volume da peça [1].

Vantagens dos ensaios por ultrassom:

Quando comparado aos outros ensaios não destrutivos, o ensaio por ultrassom possui as seguintes vantagens: [2]

- Grande poder de penetração, o qual permite a detecção de descontinuidades em grandes profundidades. O ensaio ultrassônico é feito rotineiramente em espessuras de centenas de milímetros em diversos tipos de peças e podem-se inspecionar eixos forjados com comprimentos em torno de cinco metros;
- Alta sensibilidade, permitindo a detecção de descontinuidades na ordem de 0,5mm ou menores;
- Precisão maior que a dos outros ensaios não destrutivos na determinação da posição de descontinuidade interna, estimando o seu tamanho e caracterizando sua orientação, forma e natureza;

- Somente é necessário o acesso a uma superfície;
- O equipamento opera eletronicamente, fornecendo indicação instantânea das discontinuidades; isso possibilita a interpretação imediata, automação, rápida varredura, monitoração on-line da produção e controle do processo. Em muitos sistemas pode ser obtido um registro permanente para análise futura;
- Varredura volumétrica da peça, possibilitando a inspeção desde uma superfície até a superfície oposta;
- Não gera efeitos prejudiciais ao operador ou as pessoas próximas, nem aos materiais e equipamentos; e
- Portabilidade.

A técnica de ultrassom com ensaios não destrutivos consiste em fazer com que uma onda ultrassônica emitida por transdutor, percorra o material a ser ensaiado, efetuando a análise dos ecos recebidos, pelo mesmo transdutor ou por outro. O transdutor, também é chamado de cabeçote.

2.1.1 Princípios Físicos do Ultrassom

Características das ondas ultrassônica

As ondas ultrassônicas consistem nas oscilações de partículas atômicas ou moleculares de uma substância, em sua posição de equilíbrio. Elas se propagam da mesma maneira que as ondas audíveis se propagam em meios elásticos, mas nunca no vácuo. (conforme a figura 1)

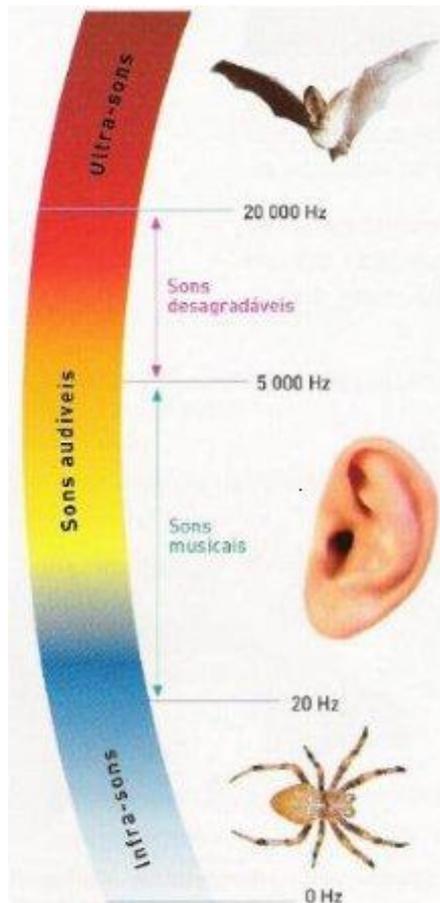


Figura 01: Espectro de frequências sonoras

Os feixes da onda ultrassônica com uma velocidade (V) característica num meio homogêneo podem ser refletidos e refratados quando passam por meios diferentes.

A energia, velocidade e a amplitude (elongação máxima $[y]$) são constantes e dependem do meio de onde propagam.

As ondas ultrassônicas propagam se nos meios elásticos. Quando as partículas atômicas ou moleculares são removidas de suas posições de equilíbrio por quaisquer forças externas; tensões internas agem para recolocar as partículas em suas posições originais. Em razão das forças interatômicas existentes entre partículas adjacentes; o deslocamento de uma partícula induz a um deslocamento de partículas vizinhas e assim por diante, propagando desta maneira uma onda elástica. O deslocamento real da matéria que ocorre nas ondas ultrassônicas é ínfimo. Contudo sabemos que o tempo gasto para o ponto vibrar de uma vibração completa é igual a T ou período. O período de uma vibração é medida em segundos; o número de vibrações na unidade de tempo (segundos) chama-se de frequência de uma vibração e é igual ao inverso do período conforme a formula abaixo.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

A amplitude, modo de vibração e a velocidade das ondas diferem nos sólidos, líquidos e gases em função da grande diferença na distância média, entre as partículas. Estas diferenças influenciam as forças de atração entre as partículas e o comprimento elástico dos materiais. [3]

Os conceitos acima como comprimento de onda, frequência, amplitude e velocidade tem com a relação à fórmula abaixo:

$$V = f \cdot \lambda \quad (2)$$

Sendo:

V=velocidade;

f=frequência;

λ =comprimento de ondas

O modo como se deslocam as partículas no meio classificam as ondas em: longitudinais e transversais.

2.1.1.1 Ondas Longitudinais

Conhecidas também como ondas de compressão; é o tipo de onda ultrassônica mais comumente usada na inspeção de materiais. Propagam-se através do material como uma série alternada de compressões e rarefações nas quais as partículas vibram na direção da propagação da onda.

Na figura (2) apresenta uma representação deste tipo de onda

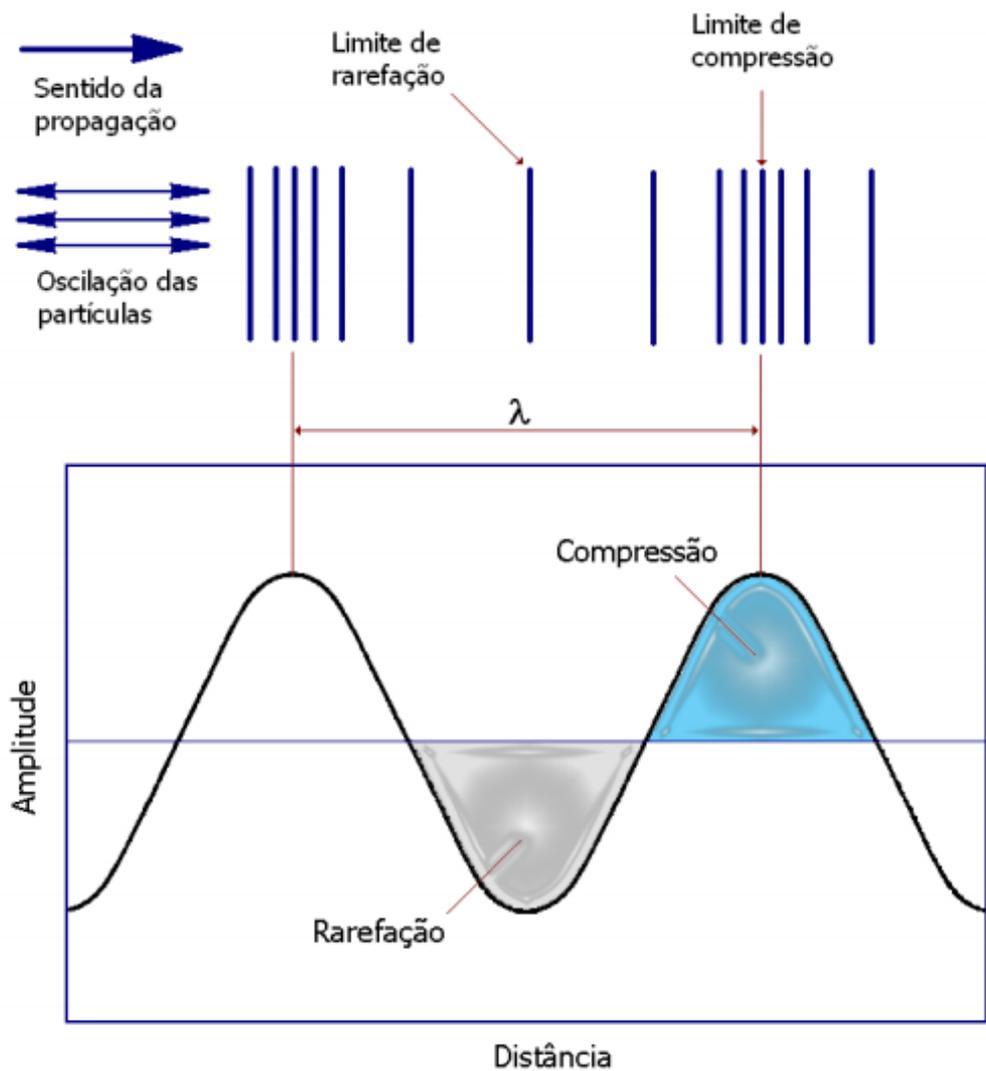


Figura 02: Propagação da onda longitudinal.

O eixo vertical pode representar pressão ou deslocamento da partícula e o eixo horizontal pode representar o tempo ou distância, uma vez que a velocidade do som em um determinado material é constante. Esta relação é utilizada nas medidas de velocidade de ondas ultrassônicas [1].

As ondas longitudinais propagam-se com facilidade em meios líquidos, gasosos e sólidos. Nos líquidos e gases as ondas longitudinais propagam-se conforme as mudanças nas densidades por causa das colisões entre moléculas como as adjacentes.

2.1.1.2. Ondas Transversais

As ondas transversais seguem a analogia de uma corda vibrando ritmadamente, na qual cada partícula ora vibra para cima ora para baixo no plano perpendicular à direção de propagação. Uma onda transversal está representada na figura 3 que representa esquematicamente as oscilações das partículas, a frente de onda, a direção de propagação da onda e o correspondente comprimento de onda. Ao contrário das ondas longitudinais, a propagação das transversais necessita que as interações entre partículas vizinhas sejam de natureza forte.

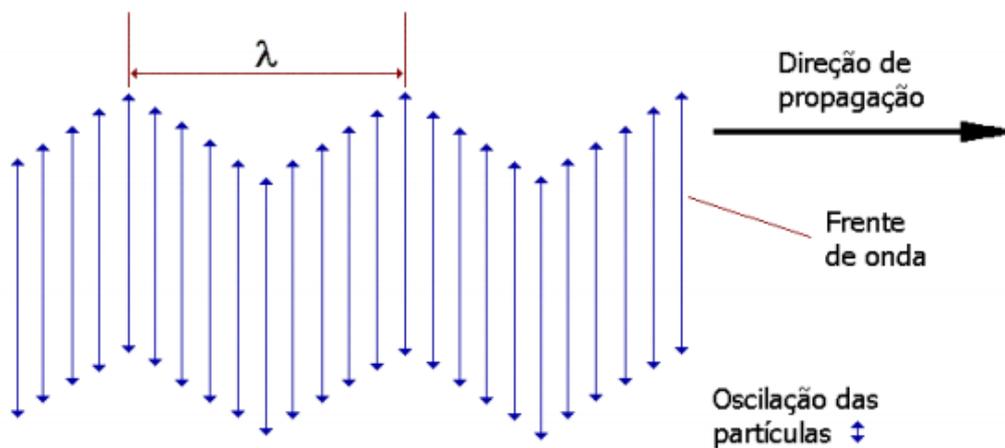


Figura 03: Propagação da onda transversal

As ondas transversais não se propagam nos meios líquidos e gasosos [1], [4].

A velocidade das ondas transversais são aproximadamente 50% menores que a velocidade das ondas longitudinais no mesmo meio.

2.1.1.3. Velocidade do som

A velocidade do som pode ser tratada como uma propriedade macroscópica e usada para determinar propriedade elástica e também para identificar mudança na microestrutura dos materiais [4].

Como já fora mencionado, a velocidade do som é constante conforme cada material e também para o tipo de onda é independente da frequência e do comprimento de onda como mostra a tabela (1) abaixo:

Tabela 01: Propriedades acústicas dos materiais [4]

MATERIAL	PESO ESPECIFICO [kg/m³]	VELOCIDADE TRANSVERSAL [m/s]	VELOCIDADE LONGITUDINAL [m/s]
Aço carbono	7850	3250	5920
Aço baixa liga	7850	3250	5940
Aço inox 304L	7900	3070	5640
Aço inox 410	7670	2990	5390
Acrílico (perspex)	1180	1430	2730
Água (gelo)	900	1990	3980
Água (20°C)	1000	-	1480
Alumino	2700	3130	6320
Alumino (óxido)	3600	5500	9000
Bismuto	9800	1100	2180
Bronze	8100	2120	4430
Cádmio	8600	1500	2780
Chumbo	11400	700	2160
Cobre	8900	2250	4700
Concreto	2000	-	4600
Ferro fundido	6900	2200	5300
Ferro cinzento	7200	2650	4600
Glicerina	1300	-	1920
Inconel	8500	3020	5820
Magnésio	1700	3050	5770
Molibdênio	10200	3350	6250
Níquel	8800	2960	5630
Nylon	1100	1080	2620
Óleo automotivo	870	-	1740
Ouro	19300	1200	3240

Platina	21400	1670	3960
Polietileno	940	925	2340
Porcelana	2400	3500	5600
Prata	10500	1590	3600
PVC	1400	1060	2395
Quartzo (natural)	2650	-	5760
Titânio	4540	3180	6230
Tungstênio	19100	2620	5460
Urânio	18700	-	3200
Vidro	3600	2560	4260
Zinco	7100	2410	4170

A velocidade do som está relacionada com o módulo de elasticidade E a densidade do material

$$V = \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

Também de uma forma mais completa a velocidade do som pode ser determinada pela fórmula:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (4)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

Onde:

V_L = velocidade da onda longitudinal (m/s)

V_T = velocidade da onda transversal (m/s)

E = módulo de elasticidade ($\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$)

μ = coeficiente de Poisson

G = módulo de rigidez ($\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$)

ρ = massa específica (kg/m^3)

2.2. TRANSDUTORES

As ondas ultrassônicas são geradas por transdutores ultrassônicos. De um modo geral, um transdutor figura (4) é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro tipo. Os transdutores ultrassônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores utilizam materiais piezoelétricos que apresentam um fenômeno chamado *efeito piezoelétrico*.

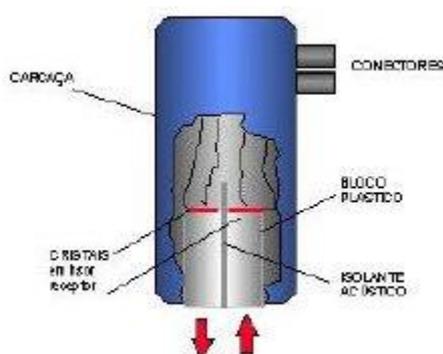


Figura 4: Representação do transdutor [8]

O efeito piezoelétrico é a capacidade de alguns cristais gerarem tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica. Referente à geração de corrente elétrica, juntou-se a designação eletricidade, de modo que piezoeletricidade é interpretado como a produção de energia elétrica devido a compressão sobre determinados materiais. Este fenômeno manifesta-se da seguinte forma: aplicando-se cargas mecânicas nas duas faces opostas de uma lâmina de cristal de quartzo, ocorre a formação de cargas elétricas de polaridades contrárias nessas faces, isto é, em uma das faces formam-se cargas positivas e na outras cargas negativas. Experiências diversas mostraram que as cargas elétricas desenvolvidas na lâmina de cristal são proporcionais às cargas mecânicas aplicadas.

Podem-se produzir vibrações mecânicas desde alguns ciclos por segundo (Hertz) até cerca de 25.000.000 (25 MHz) de ciclos por segundo (na maioria das aplicações). A faixa de utilização nos ensaios por Ultrassom é de 0,5 MHz a 15 MHz, podendo chegar a 20 MHz em transdutores de aplicações especiais

2.3. PROCESSAMENTO DE SINAIS DIGITAIS

O processamento digital de sinal consiste no método de analisar sinais do mundo real (representados por uma sequência de números) usando ferramentas matemáticas, podendo assim realizar transformações ou extrair informações desses sinais [5].

Graças aos grandes avanços em processamento de sinais, como por exemplo os estudos desenvolvidos por Cooley e Tukey que escreveram um algoritmo rápido para o cálculo da DFT, foi possível o surgimento de diversas aplicações tais como: telefonia celular, entretenimento (DVD), reconhecimento de voz, caracterização de sinais ultrassônicos etc.

Entretanto, nem a natureza nem os seres humanos utilizam sinais digitais para se comunicarem no dia a dia. O mundo real consiste numa infinidade de sinais analógicos, que não são ou não podem ser entendidos em linguagem de máquina. Para que os computadores, celulares ou quaisquer dispositivos eletrônicos possam trabalhar, é necessário que haja um processamento desses sinais analógicos na forma digital [6].

Os sinais tais como os sinais ultrassônicos constituem uma importante fonte de informação para identificação e caracterização de materiais. Tradicionalmente estes sinais são investigados através da análise espectral de Fourier. Esse tipo de análise aplica-se apenas aos sinais que podem ser classificados como estacionários.

2.3.1 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier tem como base a descoberta que ocorreria por volta de 1800, pelo matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier, que fornecera uma vasta gama de pesquisas matemáticas realizadas nos séculos XIX e XX. O conceito da transformada de Fourier é que uma função arbitrária, mesmo contendo descontinuidades, poderia ser expressa por uma função analítica. Com essa afirmação ocorreram muitas constatações por parte dos grandes matemáticos da época, tais como: Biot, Laplace e Poisson.

Graças às suas pesquisas, terminaram por fornecer o alicerce para muitos avanços na matemática, ciência e engenharia. A característica da transformada de Fourier, que a torna como uma valiosa ferramenta de análise, é a habilidade para decompor qualquer função periódica, tais como sinais resultantes de sensores que captam vibrações do cristal do transdutor, ou um sinal sonoro complexo, em uma série de funções de uma base ortonormal,

composta por senos e cossenos. Os coeficientes destas funções da base ortonormal representam a contribuição das componentes de seno e cosseno do sinal em todas as frequências. Isso possibilita a análise do sinal em termos de suas componentes de frequência [7]

Uma grande desvantagem da transformada de Fourier é quando a função que rege o sinal não for periódica, pois é impossível escrevê-la como combinação linear de uma família de senos e cossenos harmonicamente relacionados.

No entanto, muitas vezes é possível escrevê-la como combinação linear de todos os senos e cossenos existentes, utilizando todas as frequências disponíveis.

Um sinal discreto $x(n)$ terá uma transformada de Fourier somente se a soma for:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(n) e^{-j\omega n} \quad (7)$$

E sua transformada (Fourier) inversa sendo dada por :

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (8)$$

A transformada de Fourier é uma transformada linear, tendo as propriedades daí decorrentes: a transformada de Fourier da soma de dois sinais discretos é a soma das suas transformadas de Fourier e a transformada de Fourier de um sinal discreto multiplicado por uma constante é a sua transformada de Fourier multiplicada por essa constante [7]

A transformada de Fourier de um sinal discreto $x(n)$ é $X(e^{j\omega})$, então se pode escrever a transformada de Fourier de um sinal discreto $x(n-k)$ é:

$$\sum_{n=-\pi}^{+\pi} x(n-k) e^{-j\omega n} = \sum_{n=-\pi}^{+\pi} x(n) e^{-j\omega(n+k)} = e^{-j\omega k} X(e^{j\omega}) \quad (9)$$

2.3.2 F.F.T (Transformada Rápida de Fourier)

A transformada rápida de Fourier (do inglês Fast Fourier Transform – FFT) é um algoritmo eficiente para calcular a transformada discreta de Fourier [8].

A FFT é de grande importância para uma variedade de aplicações, tais como, o processamento de imagens, a resolução de equações diferenciais parciais, a caracterização de padrões de sinais ultrassônicos, etc.

A transformada rápida de Fourier também chamada de algoritmo Cooley – Tukey. J.W. Tukey e J.W. Cooley receberam muitos créditos por descobrirem a FFT, no momento certo, no início da revolução da informática, pois em retrospectiva, outros matemáticos já tinham descoberto a técnica muitos anos antes que Cooley – Tukey. Por exemplo, o matemático alemão Karl Friedrich Gauss (1777 – 1855) usou este método um século antes. Mas este trabalho ficou inviável por falta de ferramentas para torná-lo prático, então acabou caindo no esquecimento.

O princípio básico da FFT é a realização do cálculo de uma dada DFT de comprimento N, com base em DFTs de comprimento mais curto, através de uma decomposição da sequência de entrada que designa de decimação no tempo (decimation in time DIT) ou da sequência de saída que designa de decimação na frequência (decimation in frequency DIF), tirando proveito das propriedades de simetria e periodicidade [9].

Para o cálculo direto da DFT é utilizado a equação abaixo:

$$x(K) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{Kn} \quad , k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

Então $x(n)$ e $X(K)$ sendo complexos, conclui-se que o número de operações aritméticas envolvidas nos cálculos da DFT é:

* multiplicações complexas $N^2 = 4N^2 \text{ multiplicações..reais} + 2N^2 \text{ adição}$

* adições complexas $N(N-1) = 2N(N-1) \text{ adições..reais}$

O que nos leva a concluir que a DFT é proporcional a N^2 , com isso os cálculos da DFT tornam se complicados, pois se N for muito grande, o custo computacional torna se muito grande também conforme podemos verificar na figura (5) abaixo:

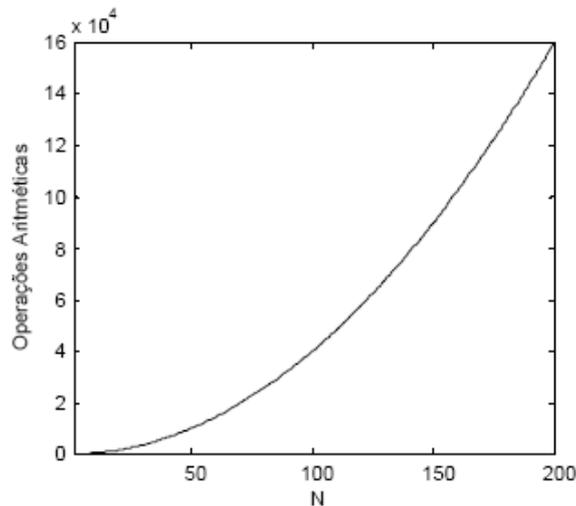


Figura 05: Custo computacional de N adições complexas [7]

2.3.2.1 Como funciona da FFT

Para a realização do algoritmo da transformada rápida de Fourier, os sinais no domínio do tempo são divididos em três passos.

A FFT opera através de decomposições de um ponto N do sinal no domínio do tempo em N domínios do tempo. Os sinais de cada uma das decomposições são compostos por um único ponto. O segundo passo é calcular os espectros de frequência N correspondentes a estes sinais do domínio N tempo. Por último, os espectros de N são sintetizados em um espectro de frequência única [9].

A figura abaixo ilustra um exemplo do primeiro passo para o cálculo da FFT que é a decomposição do sinal no domínio do tempo. O sinal em questão possui 16 pontos e é dividido em quatro fases. Na primeira fase de decomposição o sinal é dividido em dois, cada parte é composta por 8 pontos, repare que o sinal é separado em parte, só com os pontos pares e uma outra parte só com os pontos ímpares. Na segunda etapa da decomposição o sinal é novamente dividido em 4 partes, cada parte com 4 pontos cada (repare que a divisão de pares e ímpares continuam). Este processo continua até que só haja N sinais constituídos por apenas um ponto.



Figura 6: Decomposição do sinal com 16 pontos. Adaptado [9]

O processo de decomposição é na verdade um reordenamento das amostras do sinal no domínio do tempo. A decomposição sucessiva do sinal corresponde em separar os dados em índices pares e ímpares (como já foi dito acima); logo após a decomposição acontece um reordenamento dos dados. Essa reordenação tem a particularidade de poder exprimir a representação binária da ordem de entrada, por meio de uma inversão de ordem dos bits. Por exemplo, a amostra 3 (0011) é trocada pela amostra de número 12 (1100), da mesma forma que a amostra de número 14 (1110) é trocada pela amostra de número 7 (0111), o nome dessa inversão é *bit-reversal* figura (7) [7],[9]e [10].

Amostragem em ordem normal			Amostragem após bit-reversal	
<i>Decimal</i>	<i>Binário</i>		<i>Decimal</i>	<i>Binário</i>
0	0000		0	0000
1	0001		8	1000
2	0010		4	0100
3	0011		12	1100
4	0100		2	0010
5	0101		10	1010
6	0110	→	6	0100
7	0111		14	1110
8	1000		1	0001
9	1001		9	1001
10	1010		5	0101
11	1011		13	1101
12	1100		3	0011
13	1101		11	1011
14	1110		7	0111
15	1111		15	1111

Figura 07: Inversão de bits. Adaptado [12]

A etapa seguinte da FFT é encontrar os espectros de frequência de 1 ponto no domínio N tempo. O que nos leva a conclusão que o ponto é igual a si próprio (por causa de reversão de bits), com isso não teremos nada a fazer.

A última etapa é reconstruir o sinal no domínio da frequência. Para reconstruir o sinal basta combinar os espectros de frequência de N na ordem contrária que a decomposição do domínio do tempo ocorreu.

Com isso o custo computacional da DFT calculada pelo algoritmo da FFT cai de N^2 para $N \cdot \log_2 N$, o que representa um ganho computacional de $N/\log_2 N$, ou seja, menos cálculos computacionais e com isso gera maior agilidade, como mostra a figura (8).

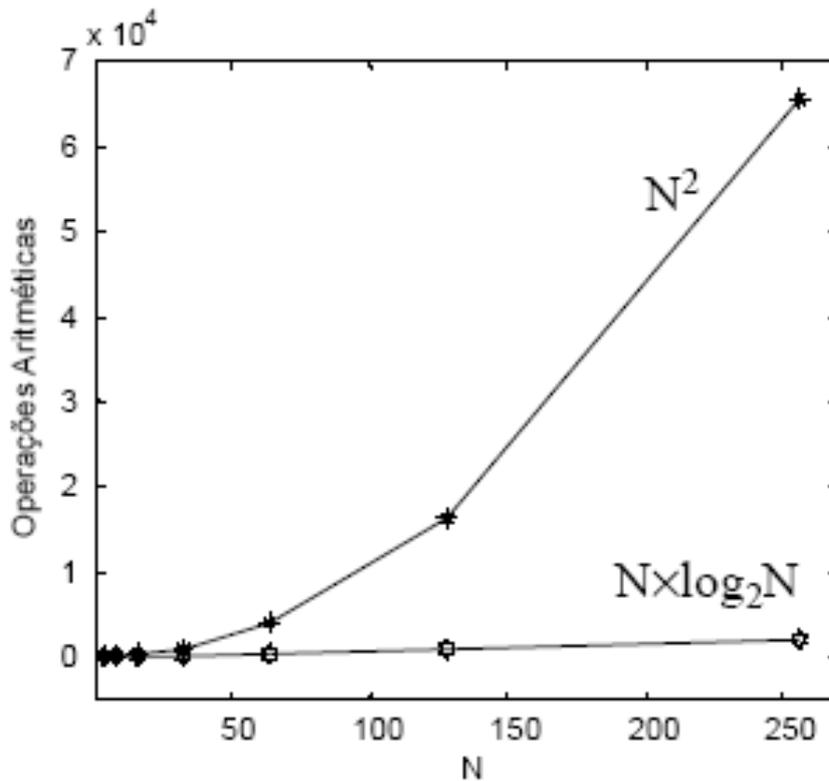


Figura 08 : Ganho computacional utilizando a FFT [11]

2.4. ULTRASSOM NO DOMINIO DO TEMPO

As técnicas por ensaios não destrutivos por meio de ultrassom tem sido cada vez mais aprimoradas em diversas áreas de atuações devido a inúmeras aplicações e facilidades de implementações.

Na maioria das aplicações industriais o ultrassom é utilizado para detecção e dimensionamento de descontinuidade, medindo o tempo de percurso do sinal ultrassônico (intervalo entre dois ecos consecutivos), no material - que esta sendo analisado na figura (9).

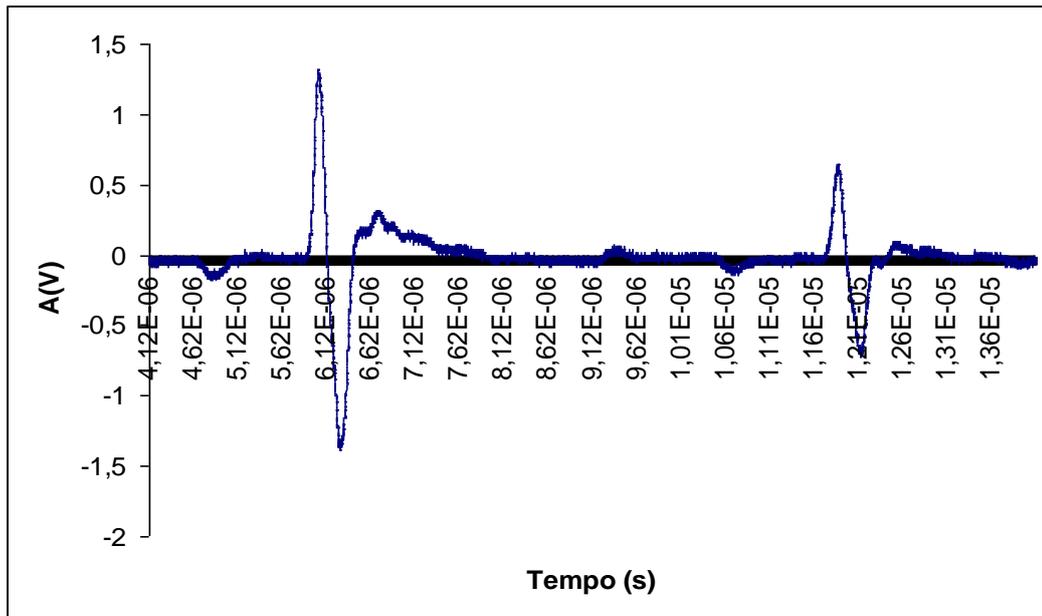


Figura 09: Sinal adquirido pela técnica de pulso-eco no domínio do tempo com um transdutor de 5MHz em um metal com a espessura de 10mm [1].

A determinação da velocidade do sinal ultrassônico fora é a partir da relação abaixo:

$$V = 2S/T \tag{11}$$

Onde V, é a velocidade do sinal ultrassônico; S, é a espessura do material analisado e T, é o tempo de percurso que é determinado pela distância entre dois ecos consecutivos.

Cabe informar que o sinal ultrassônico emitido pelo cristal do transdutor, percorre a espessura do material analisado e reflete nas interfaces formadas no fundo do material e na superfície.

Para cada incidência do sinal do ultrassom na superfície do transdutor, ocorrerá uma reflexão e um eco correspondente a esta reflexão será visualizado no equipamento ultrassônico formando o sinal no domínio do tempo. Portanto, em geral é possível observar vários ecos correspondentes às reflexões de fundo pertencente à mesma espessura.

Neste método de medição, há exceções, quando é aplicada em certos tipos de materiais (Ex: cerâmicos). Dependendo da sua densidade, ocorre uma forte atenuação do sinal, o que pode dificultar a determinação dos ecos.

Outro motivo que dificulta a medição do tempo de percurso do sinal do ultrassom é quando o material tem espessura reduzida, pois acaba ocorrendo uma sobreposição dos ecos correspondente ao sinal ultrassônico, com isso não permitindo uma análise clara do sinal.

Este empacotamento figura (10) pode ser explicado porque o cristal piezelétrico (cristal que compõem o transdutor) após emitir o sinal recebe a resposta do sinal ultrassônico que percorre o material analisado em um espaço curto de tempo, assim acaba não ocorrendo tempo suficiente para que o eco correspondente a este sinal seja identificado no aparelho ultrassônico antes da próxima emissão. Com isso os ecos ficam muito perto um do outro tornando sua análise prejudicada [11].

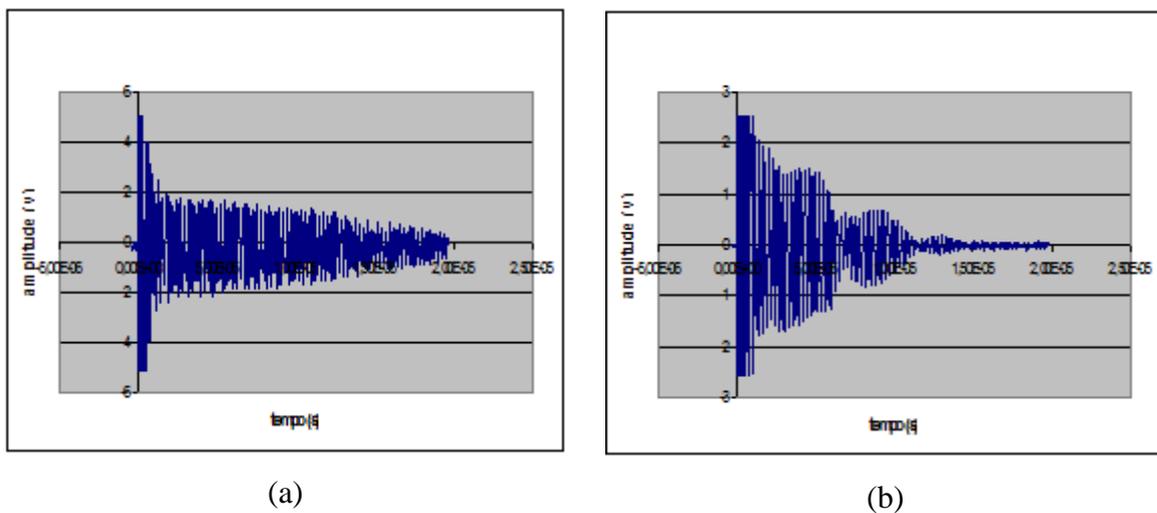


Figura 10: Sinal ultrassônico empacotado da pastilha (a) e sinal ultrassônico empacotado da chapa de alumínio (b)

Na figura 10.a podemos perceber que é muito fácil determinar a distância entre os ecos, por outro lado, se torna impossível a determinação dos ecos da figura 10.b, pois os ecos estão muito próximos, sendo difícil determinar dois ecos consecutivos.

2.5 ULTRASSOM NO DOMINIO DA FREQUÊNCIA

Tendo em vista as dificuldades, utilizando a medida do tempo de percurso do sinal ultrassônico apresentado no tópico anterior (sinal empacotado e sinal atenuado), foi necessário o desenvolvimento de uma técnica alternativa para a caracterização de materiais e

uma nova forma de visualizar o sinal ultrassônico, agora não mais no domínio do tempo, mas sim no domínio da frequência o que acarreta outra forma de apresentar o sinal.

O ato de passar o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência traz a vantagem de melhorar a visualização do sinal.

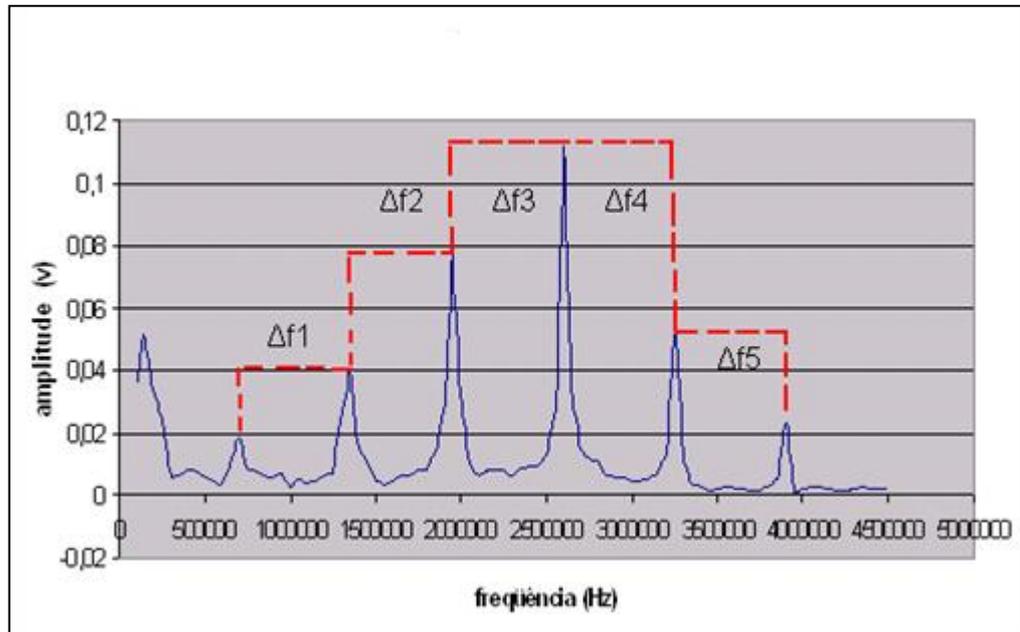


Figura 11: Determinação dos Δf do sinal no domínio da frequência

Com base nesses argumentos a maneira de determinar a velocidade ultrassônica no domínio da frequência se torna análoga à determinação pela técnica convencional; a única diferença é na equação que calcula a velocidade ultrassônica, pois, ao invés de usar o tempo aplicar-se-á o inverso dele, que por sua vez é a frequência.

2.5.1. Determinação do *delta f*

Já foi demonstrado que um sinal no domínio do tempo pode ser transformado para o domínio da frequência sem perder suas propriedades (propriedade de dualidade) também já foi mostrada que um sinal periódico no domínio do tempo tem como uma transformada outro sinal periódico no domínio da frequência (propriedade de periodicidade) que este sinal é homogêneo e aditivo (propriedade de linearidade).

Agora será mostrado como se determina o Δf para que se possa calcular a velocidade ultrassônica no domínio da frequência.

Primeiramente se adquire o sinal ultrassônico no domínio do tempo após percorrer o material. Após a aquisição do sinal ultrassônico no domínio do tempo realiza-se a transformada rápida de Fourier do sinal para o domínio da frequência figura (12) e (13), no caso deste experimento, o osciloscópio usado possuía a capacidade de realizar automaticamente a FFT.

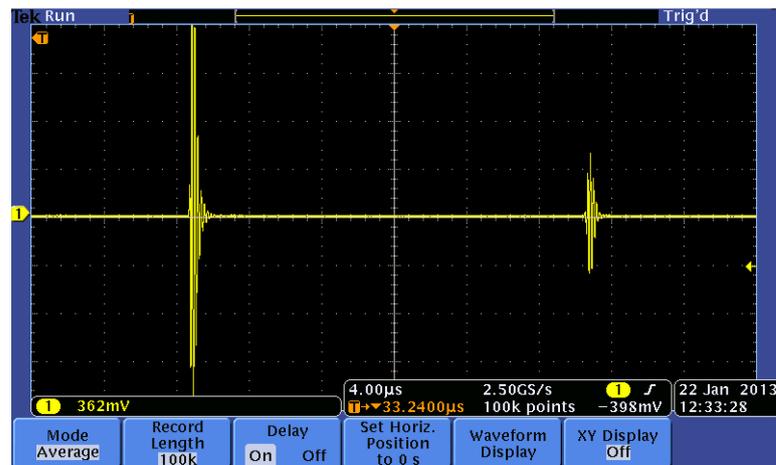


Figura 12: Sinal ultrassônico no domínio do tempo.

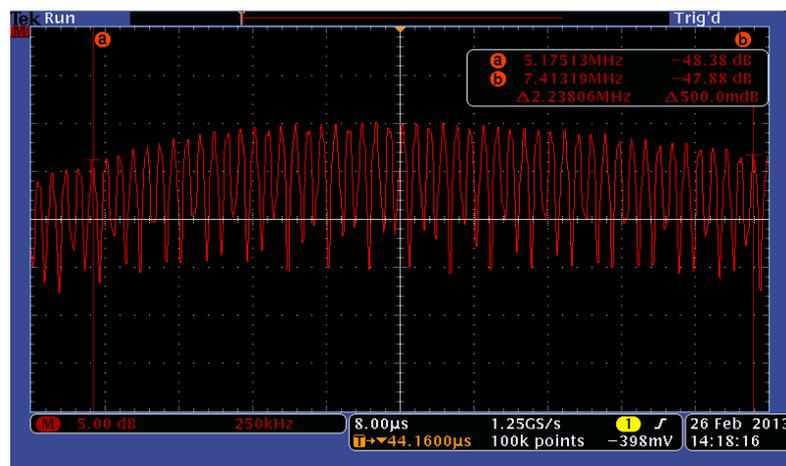


Figura 13: Sinal ultrassônico no domínio da frequência.

2.6. TENSÕES ATUANTES

Quando não está em serviço, atuam num material ou componente mecânico apenas as tensões residuais, mas em serviço tem-se o conjunto de tensões residuais e aplicadas. É de fundamental importância a compreensão na atuação de cada tipo de tensão [14].

2.6.1 Tensão Aplicada

É toda e qualquer tensão aplicada sobre um material de uma estrutura ou componente mecânico em serviço ou devido a um gradiente térmico, isto é, a tensão que não é inerente à fabricação do material.

2.6.2 Tensão Residual ou Interna

Quando existe um estado de tensão num material, sem aplicação de carga externa ou outra fonte de tensão, tal como um gradiente térmico, esta tensão existente é chamada de tensão interna ou residual.

2.6.2.1 Produção de tensão residual

A tensão residual surge em materiais de componentes ou estruturas mecânicas durante os estágios de fabricação por muitas razões [12 e 13]:

- Na deformação ou conformação plástica como, por exemplo, laminação, trefilação, extrusão, dobramento, forjamento, prensagem, shot peening (partículas esféricas metálicas, de vidro ou de cerâmica) e laser shock peening (LSP) [12];

- Durante os processos de fabricação tais como: soldagem, brasagem, revestimento, eletrodeposição, usinagem, retifica, etc. [12];
- Durante tratamento térmico ou termoquímico incluindo resfriamento brusco, cementação, nitretação, endurecimento superficial dos aços e eletrodeposição de íons [12].

Como exemplo de tratamentos térmicos aplicados durante a fabricação que podem afetar a tensão residual, pode ser citado o resfriamento brusco a partir de uma temperatura elevada o qual pode causar tensão residual no material, enquanto um tratamento de alívio de tensão pode reduzi-la [13].

A operação de montagem das estruturas metálicas e componentes mecânicos também geram tensões residuais.

2.6.2.2. Categorização das tensões residuais

As tensões residuais podem ser classificadas pelas Fontes de Geração, como [1]:

(i) Relacionadas ao material

Um bom exemplo é a tensão trativa gerada nos compósitos de matriz metálica durante a fabricação devido à diferença de expansão térmica entre a fibra e a matriz metálica. Outros exemplos incluem o material com a microestrutura de múltiplas fases ou inclusões [1].

(ii) Relacionadas ao processo

Inclui aquelas geradas durante a soldagem, fundição, resfriamento brusco, corte, cementação, etc. [1].

A maioria das tensões relacionadas aos processos é prejudicial ao tempo de vida em serviço de um componente, porém algumas são benéficas.

Como exemplo, algumas técnicas são usadas para a produção de tensões residuais compressivas abaixo da superfície, aumentando significativamente a resistência à fadiga do componente[1].

(iii) Causadas com relação ao serviço

São tensões como aquelas produzidas pela deformação plástica em superfícies laminadas [1].

Outra maneira de se classificar as tensões residuais é pela distribuição espacial delas. Em função da distância ou intervalo sobre o qual as tensões residuais podem ser observadas elas são classificadas em três tipos [1 e 12].

2.7 ASPECTOS BÁSICOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

A compressão física é um resultado da aplicação de uma força de compressão a um material, resultando em uma redução em seu volume, ou, como tratado em resistência dos materiais e engenharia, uma redução de uma de suas dimensões, axial com a atuação da força, e um aumento da seção transversal a este mesmo eixo, quando a deformação da peça nesta direção é permitida, pois deve-se considerar que teoricamente, neste caso, seu volume mantenha-se constante. Um exemplo característico de objeto submetido a esforços de compressão são as colunas dos prédios, que recebem, com a mesma direção de seu eixo, as cargas acima delas.

A compressão ocorre quando a força axial aplicada estiver atuando com o sentido dirigido para o interior da peça. Com isso, a peça sofre deformações. Em um primeiro momento, sofre uma deformação elástica, porém, quando atinge sua tensão de escoamento, a peça passará a entrar em sua deformação plástica, ou seja: o material estará sendo deformado permanentemente, ao contrário do regime elástico, onde a organização molecular volta ao estado onde se encontrava no início.

A compressão tem muitas implicações na resistência dos materiais, na física e na engenharia estrutural, pelo fato da compressão produzir quantidade considerável de tensão. Induzindo a compressão, propriedades mecânicas, tais como a força de compressão ou o módulo de elasticidade, podem ser medidos. Os cientistas podem utilizar máquinas para induzir a compressão. Este tipo de experimento é chamado de ensaio de compressão, que é utilizado para comprovar as características mecânicas de uma peça, descobrindo assim a que tensão ela sofrerá ruptura. Caracterizam-se como ensaios destrutivos, uma vez que a peça fica normalmente inutilizada após o ensaio [15].

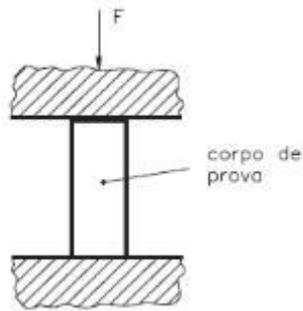


Figura 14: Representação do sentido de aplicação da força no ensaio de compressão

2.8 TÉCNICAS DE MEDIDAS DE TEMPO

O objetivo a partir de agora é descrever técnicas pesquisadas na literatura constante do nosso levantamento bibliográfico que possam nos auxiliar e conduzir a um entendimento formal da evolução dos métodos de medida em que se utilizam ondas ultrassônicas, tendo em vista a importância deste processo na composição de todos os trabalhos produzidos e apoiados pelo LABUS.

Medições realizadas ao longo de um período de muitos anos por inúmeros investigadores resultaram numa acumulação extensiva de dados sobre a velocidade do som. No entanto, há um interesse continuado em tais medições em novos materiais e em materiais a serem utilizados em situações hostis ou anormais (altas temperaturas e altas pressões, por exemplo). Há basicamente três formas principais de se medir a velocidade – e não é difícil inferir que quando se descreve uma forma de medir velocidade, pode-se pensar, por reciprocidade, na possibilidade de medida de tempo de percurso do som:

- 1- por determinação do comprimento de onda contínua em uma frequência conhecida;
- 2- determinando o tempo necessário para uma onda progressiva para percorrer uma distância conhecida; e
- 3- determinando o ângulo de refração de um feixe ultrassônico incidente numa interface de dois meios, em um dos quais a velocidade da onda é conhecida.

Os métodos decorrentes dessas formas foram implementados de várias maneiras, cujos exemplos foram elencados e serão descritos em tópicos a seguir. Todas as medições de velocidade (tempo) e de atenuação de som estão relacionadas com a equação básica para uma onda progressiva se propagando na direção x em um meio:

$$A=A_0.e^{-\alpha x}.cos(kx-\omega t) \quad (12)$$

onde

A é a amplitude da onda ultrassônica ao longo do eixo x ;

A_0 é a amplitude da onda ultrassônica na origem ($x = 0$);

α é o coeficiente de atenuação;

k é a constante de propagação ($= 2\pi/\lambda = \omega/c$);

ω é frequência angular ($= 2\pi f$); e

c é a velocidade de fase.

2.8.1 Método do Interferômetro

O interferômetro é um dispositivo de ondas contínuas que tem sido utilizado para medição com certa precisão da velocidade e da atenuação do som em líquidos e gases em que ondas estacionárias podem ser estabelecidas. O dispositivo consiste de uma coluna de fluido com um transdutor fixo em uma das extremidades e na outra um refletor móvel. Com uma frequência fixa, o refletor é movido em relação ao transdutor com auxílio de um micrômetro. Ao mover o refletor, as ondas refletidas são periodicamente colocadas em fase e fora de fase com as ondas transmitidas. Como resultado, podem ser observadas interferências construtivas e destrutivas, respectivamente. O efeito da interferência no cristal do transdutor influencia o sinal detectado pelo sistema eletrônico. Assim, o comprimento de onda do som pode ser determinado pela distância medida no micrômetro, pois ao mover o refletor em um ciclo entre dois pontos de interferência construtiva consecutivos, esta distância é igual a meio comprimento de onda. Assim, a velocidade do som pode ser obtida multiplicando-se a frequência pelo comprimento de onda.

O método do interferômetro fornece precisão da ordem de 0,05%, que dependerá da qualidade e da calibração do micrômetro utilizado, do paralelismo entre o transdutor e a superfície refletora e da exatidão na determinação da frequência. A atenuação pode ser encontrada através do decaimento da amplitude ao ser visualizada em função da distância, variando a posição entre o refletor e o transdutor.

2.8.2 Método da Ressonância

O método da ressonância é similar ao método do interferômetro e pode ser utilizado para medir a velocidade do som em gases, líquidos ou sólidos. Este método envolve o uso de um transdutor fixo e um refletor, ou dois transdutores colocados a uma distância conhecida. Neste método o transdutor é excitado através de uma faixa de frequência com o objetivo de determinar sucessivas ressonâncias. A diferença entre duas frequências de ressonância sucessivas, em um meio não dispersivo, é igual à frequência fundamental de ressonância do meio, podendo ser utilizada para o cálculo da velocidade através da relação:

$$V=2.l.\Delta f, \quad (13)$$

onde

l é a distância entre o transdutor e a superfície refletora; e

Δf é a diferença entre sucessivas frequências de ressonância.

No caso de ensaios em corpos sólidos, por técnica de contato, l é a própria espessura do material analisado.

A precisão do método da ressonância depende da acurácia da determinação da frequência e da distância das superfícies refletoras.

É importante lembrar que diferenças de fase devido a interface refletora devem ser consideradas.

2.8.3. Método "Sing-Around"

O método "*Sing-Around*" é um processo para determinar a velocidade do som que envolve o uso de dois transdutores piezoelétricos, um em cada extremidade da amostra. Um transdutor recebe um impulso a partir da fonte eletrônica e o converte num pulso de ultrassom na amostra. O pulso de energia ultrassônica, depois de passar pela amostra, é detectado pelo transdutor receptor. O pulso recebido aciona o gerador eletrônico para iniciar um pulso de sucesso. Desta forma, a velocidade está relacionada com a taxa de repetição de pulso como segue:

$$c = \frac{l.PRR}{1 - e.PRR} \approx l.PRR \quad (14)$$

onde:

PRR é a taxa de repetição de pulso por segundo;

l é o comprimento da amostra; e

e é um fator de correção para atrasos nos transdutores, no acoplamento entre os transdutores e a amostra e em componentes elétricos.

A taxa de repetição do pulso é medida pelo contador de frequência. Os atrasos elétricos estão associados com o desacoplamento do transdutor de transmissão, tempo de subida do pulso amplificado e a geração do sinal de gatilho. Em amostras homogêneas de materiais não dispersivos, os efeitos dos atrasos acústicos e elétricos podem ser minimizados por meio de medições através de vários comprimentos de onda ao longo do caminho diferentes. Em líquidos, distâncias percorridas em amostras podem ser variadas alterando a distância entre o transmissor e o receptor, sendo necessário extremo cuidado para manter o paralelismo e medir com precisão os comprimentos de onda ao longo do caminho. Ao comparar os valores sucessivos de *l* e *PRR* correspondentes, é possível obter valores bastante precisos em relação à equação acima. Um método semelhante pode ser usado para medir a velocidade do som com precisão em sólidos não dispersivos, usando-se várias amostras de diferentes espessuras, se existirem garantias suficientes de que as propriedades do material

são uniformes a partir de amostra, além de serem tomados todos os cuidados para se obter exatamente as mesmas condições de acoplamento para todas as amostras.

Este método é útil para medir a velocidade do som a precisão relativamente alta. Além disso, é bom para monitorar mudanças na velocidade ultra-sônica de alta precisão. Papadakis credita a Forgacs o desenvolvimento “do que parece ser a melhoria final no sistema de sing-around” com uma precisão de 1 parte em 10^7 .

2.8.4 Método da Superposição de Pulso

O método de superposição de pulso é capaz de medir a velocidade do som a precisão de uma parte em cinco mil ou mais. Um transdutor piezoelétrico inicia pulsos na faixa de rádio-frequência (RF), mas de energia ultra-sônica, na amostra. Esses pulsos incidentes e refletidos dentro da amostra, quando convenientemente arranjados, são responsáveis por controlar a taxa de repetição de pulso e, reciprocamente, informa o tempo de viagem na amostra. Esta superposição dos pulsos dentro do espécime dá à técnica o seu nome.

O método é capaz de medir com precisão de um ciclo de um eco para o ciclo correspondente do eco sucedente. Um oscilador de onda contínua é usado para controlar a taxa de repetição de pulso. Quando a taxa de repetição é ajustada para que o início de um pulso coincida com o retorno do eco a partir do primeiro pulso incidente, a mudança na amplitude do sinal indica a superposição deles. A frequência do oscilador de onda contínua é monitorada por um contador de frequência. A taxa de repetição do pulso é o inverso da frequência de contínua onda e é uma medida do tempo de viagem dentro do espécime (duas vezes a espessura da amostra). A velocidade é o dobro da espessura da amostra multiplicada pela taxa de repetição do pulso após a correção de deslocamento de fase nas áreas de incidência e reflexão de pulsos. Excelentes descrições da técnica da superposição de pulso e procedimentos podem ser encontradas em outras bibliografias.

2.8.5 Método Pulse-Echo-Overlap

O método Pulse-Echo-Overlap (PEO) é semelhante em muitos aspectos com o método da superposição de pulso, sendo muito mais versátil. Considerando que o método da superposição de pulso usa apenas rajadas de ondas na faixa RF, o método PEO utiliza estas mesmas rajadas de ondas na faixa RF (para medir a velocidade de fase) ou ainda pulsos de ondas de banda larga (para medir as velocidades de grupo). Assim como o método da superposição de pulso, o método PEO é capaz de medir com boa precisão a partir de qualquer ciclo de um eco para o ciclo do eco correspondente. Outra diferença entre os dois métodos está no fato de que a superposição de pulso aceita a automatização do processo, bem como dos mecanismos de feedback para monitorar as mudanças de velocidade ou velocidade enquanto o método PEO não comporta tal funcionalidade. A superposição é realizado pela observação visual do técnico durante a realização das medições.

O *overlap* é realizado através da condução do eixo x de um osciloscópio com um oscilador CW de frequência variável. Ao ajustar a frequência do oscilador CW, um eco de interesse é provocado a aparecer em uma varredura do eixo x, e o eco próxima a varredura sucessora. Quando a frequência do oscilador CW é ajustado para que os dois pulsos coincidam exatamente, o período das oscilações é o tempo de viagem entre os sinais de interesse. A taxa de repetição do pulso de entrada é gerada a partir da fase do oscilador CW através de um divisor de frequência. Dividindo por um número grande o suficiente, ecos de um pulso serão atenuados antes do próximo ser eco ser acionado.

Uma vantagem adicional do método PEO é que o transdutor pode ser acoplado diretamente à amostra ou podem ser acoplados por uma linha de atraso, como uma sapata acrílica ou uma coluna de líquido. No método PS, o transdutor é acoplado diretamente à amostra. O método também pode ser usado para fazer medições por transmissão usando um transdutor de transmissão e outro de recepção.

2.9 ACUSTOELASTICIDADE E BIRREFRINGÊNCIA

Já foi constatado que a velocidade das ondas ultrassônicas, ao passar no interior de um sólido elástico tensionado é diferente de como seria no caso do mesmo material estar isento de tensão. Esta variação da velocidade da onda ultrassônica depende não só do estado de tensão

do material, como também das direções dos planos cristalinos, os quais vão influenciar as direções de polarização e de propagação da onda ultrassônica. Este fenômeno, da variação da velocidade da onda ultrassônica ao passar através de um material elástico sob tensão, passou a ser chamado de *efeito acustoelástico* [4].

O fenômeno da birrefringência acústica pode ser explicado de forma análoga ao da birrefringência ótica. Quando um meio homogêneo é anisotrópico, um feixe de luz que o atravessa sofre uma dupla refração, gerando ondas que apresentam diferentes ângulos de polarização. Materiais que apresentam esta propriedade são chamados duplamente refratores ou birrefringentes [4].

A velocidade de ondas cisalhantes polarizadas em uma direção de tensão principal depende do nível de tensões atuando nesta direção. A birrefringência acústica tem sido usada porque esta técnica não requer o conhecimento da espessura da amostra analisada, e assim, reduz a medida a uma diferença no tempo de percurso da onda, o qual possibilita a obtenção da diferença das tensões atuando nas direções de polarização [4].

A teoria linear da elasticidade é geralmente adequada para descrever o comportamento elástico dos materiais, usando a lei de Hooke. Nesta abordagem, a energia de deformação elástica é desenvolvida para a segunda ordem de deformação e são introduzidas as constantes de Lamé, λ e μ , para o caso de um meio isotrópico.

Entretanto, somente foi possível a descrição teórica do efeito acustoelástico, que relaciona a influência do estado de tensão no material à velocidade da onda ultrassônica, considerando a teoria não linear da elasticidade. Murnaghan desenvolveu a conceituação da energia de deformação elástica para as deformações de terceira ordem e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem (l , m e n que foram então chamadas constantes de Murnaghan) [27].

Tendo por base a teoria desenvolvida por Murnaghan em 1937, Hughes e Kelly [27] em 1953 desenvolveram as relações básicas entre a velocidade da onda ultrassônica e a deformação que surge devido a tensão no material onde essa onda se propaga.

O método funciona bem quando a propagação ocorre em um meio isotrópico. Se existe alguma anisotropia elástica causada pela microestrutura ou por uma orientação preferencial de grãos no material, a velocidade das ondas cisalhantes apresenta mudanças geralmente maiores do que as resultantes do efeito acustoelástico [26] [28].

A equações desenvolvidas por Hughes e Kelly [27] podem ser representadas em termos da variação da velocidade da onda ultrassônica em relação à tensão e podem ser apresentadas, de maneira genérica, da seguinte forma:

No caso de ondas cisalhantes,

$$\frac{V_{ij} - V_i}{V_{c0}} = k_1 \cdot \sigma_i + k_2 \cdot \sigma_j + k_n \cdot \sigma_k \quad (15)$$

Onde V_{c0} é a velocidade da onda cisalhante no material sem tensão, V_{ij} é a velocidade de uma onda ultrassônica propagando na direção i e polarizada na direção j , σ_i , σ_j e σ_k são as tensões principais nas respectivas direções. Cada constante acustoelástica corresponde a uma relação entre a direção de propagação da onda e a direção de polarização das partículas, em relação à tensão e são obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas.

Em um material isotrópico, sem efeito da tensão ou textura, a onda ultrassônica incidindo perpendicularmente ao material, quando polarizada em duas direções perpendiculares retornará ao mesmo tempo.

Na aplicação da técnica ultrassônica para avaliação da anisotropia acústica de um material, ao se utilizar ondas cisalhantes, o termo utilizado é o da birrefringência acústica. Definido como a diferença fracional da velocidade ou tempo de trânsito da onda ultrassônica em relação a duas direções perpendiculares, como mostra a equação (16):

$$B = \frac{V_l - V_t}{\frac{V_l + V_t}{2}} = - \left(\frac{t_l - t_t}{\frac{t_l + t_t}{2}} \right) \quad (16)$$

Onde t_l é o tempo de percurso da onda ultrassônica com direção de polarização alinhada com a direção de laminação do material, t_t é o tempo de percurso da onda ultrassônica com direção de polarização perpendicular a direção de laminação e B é a birrefringência.

Um material ortotrópico é aquele que tem propriedades de simetria elástica com relação a três planos cristalinos. Geralmente os materiais não são completamente ortotrópicos, o que pode influenciar na análise da variação da anisotropia acústica do material, pois efeitos como uma pequena variação na orientação cristalográfica do material podem causar uma anisotropia da mesma ordem que uma produzida por tensão.

No caso em que a tensão cisalhante for igual a zero e as direções das tensões principais coincidirem com a direção de simetria ortotrópica do material, as equações (15) e (16) são reduzidas a:

$$B = B_0 + m (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (17)$$

onde B é a birrefringência induzida pela textura e pelo estado de tensões do material, B_0 é birrefringência induzida pela textura, m é a constante acustoelástica do material [4].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A motivação do principal do experimento foi a comparação de duas técnicas de medida de tempo de percurso de ondas ultrassônicas inseridas em um bloco de alumínio. Para isso, numa primeira etapa, foram tomadas medidas de tempo dessas ondas (longitudinais e cisalhantes) nas direções dos três eixos de simetria do bloco. Houve ainda uma segunda etapa onde medidas desses mesmos tipos de ondas foram tomadas sobre apenas um dos eixos de simetria, com o bloco sob carregamentos estáticos de compressão de várias cargas.

O bloco de alumínio foi construído com 70 milímetros de aresta por conta do tamanho aproximado ao da célula de carga usada no ensaio de compressão, proporcionando boa distribuição da força aplicada nos atos de carregamento. Além disso, este tamanho favoreceu o posicionamento dos transdutores em acoplamento com o bloco, mediante marcação de referência desenhada nos centros geométricos das faces, conforme é visto na figura (15).



Figura 15: Centros geométricos das faces do bloco de alumínio. (da SILVA NETO, Ramiro, 2014)

O ensaio de carregamento previsto ocorrerá no regime elástico do bloco de alumínio.

Por que estas situações foram escolhidas? Porque as alterações na estrutura cristalina e granular dos materiais são pouco expressivas quando se trata de estudá-las no regime elástico e, do ponto de vista da onda ultrassônica, as alterações nas velocidades de propagação antes e durante os vários carregamentos estáticos são de ordem de nanossegundos (ns) portanto, por serem muito pequenas. Se detectáveis pela instrumentação aplicada aos experimentos, nos permitirá inferir sobre a capacidade de medida com alta resolução, em situação limítrofe do material.

3.2 MATERIAL

O objeto escolhido como elemento de estudo para este trabalho é um bloco de liga de alumínio 6351.

Tabela 03: Propriedades mecânicas e físicas da liga A6351 [21]

PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMINIO 6351			
DENSIDADE [kg/m ³]	LE [MPa]	MÓDULO DE ELASTICIDADE [GPa]	COEFICIENTE DE POISSON
2500 -2800	250	70-80	0,33

O processo de fabricação do bloco é a laminação e foi gentilmente cedido por Qualival Indústria Comércio e Manutenção Industrial LTDA., não tendo sido submetido a nenhum tratamento preliminar aos experimentos, que de acordo com [23], processos de conformação mecânica tais como a laminação são capazes de inserir tensão no material.

3.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO BLOCO

Neste trabalho calcular a densidade do material estudado será importante para cumprirmos uma etapa experimental que visa avaliar propriedades físicas do bloco de alumínio a partir dos mesmos dados de velocidades das ondas ultrassônicas coletados para o objetivo principal. Em 3.6 poderemos entender no que consiste esta avaliação e sua importância no objetivo principal do trabalho.

Os seguintes passos foram seguidos para o cálculo da densidade do bloco de alumínio:

3.3.1 Etapa experimental

Foram necessários um Becker de capacidade 1000 mL, balança digital de precisão 0,001g marca Shimadzu capacidade 6200g, água e o bloco de alumínio. O processo consistiu em pesar inicialmente os materiais individualmente visando obter valores de referência. Após a verificação o bloco foi submerso no Becker com volume de água conhecido. A diferença entre o volume de água deslocado no Becker e o volume inicial foi utilizada como resultado do volume experimental ocupado pelo bloco de alumínio.

3.3.2. Cálculo do Peso Específico

Para calcular o peso específico experimental do bloco foram utilizadas as equações básicas colocadas abaixo:

$$V_{\text{Bloco}} = V_f - V_i \quad [\text{cm}^3] \quad (18)$$

$$P.E = P_{\text{Bloco}} \div V_{\text{Bloco}} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (19)$$

onde:

V_{Bloco} : Volume de Bloco

V_f : Volume final do Becker

V_i : Volume inicial do Becker

P_{Bloco} : Peso do Bloco

P.E: Peso Específico do bloco

3.4 DETERMINAÇÃO DA TÉCNICA DE TOMADA DE DADOS DOS TEMPOS DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA.

As descrições a seguir valem apenas para a tomada de dados oriundos de ondas cisalhantes, em que a polarização é fator preponderante no experimento.

3.4.1 Método de captura do sinal par a par [14]

Consiste na aquisição de dois sinais em direções ortogonais de polarização de modo alternado e desta maneira, formado um par de sinais. O transdutor é posicionado numa certa direção de polarização, captura-se o sinal com os instrumentos e em seguida esta operação é repetida com o transdutor posicionado na segunda direção de polarização, que é defasada de 90° . É importante observar que neste método de captura tem-se tantos pares quanto número de repetições que forem desejadas.

Neste trabalho, como foi escolhido que 30 (trinta) medidas seriam tomadas, no total serão 60 (sessenta) medidas, tomadas alternadamente, uma em cada direção de polarização.

3.4.2 Método de captura do sinal sequencial [14]

Consiste na aquisição de dois sinais em direções ortogonais de polarização de modo contínuo (ou sequencial) em cada direção de polarização. O transdutor é posicionado numa certa direção de polarização, captura-se o número de sinais que se deseja, neste caso 30 (trinta), com os instrumentos e em seguida esta operação é repetida com o transdutor posicionado na segunda direção de polarização, que neste caso é também defasada de 90° . Vale ressaltar que neste método de captura tem-se apenas um par de medidas de tempo, composto pelas médias dos conjuntos de medidas de tempo em cada direção de polarização. Diferente do método de captura par a par, não se pode estabelecer o pareamento dessas medidas pelo fato de não ser permitido afirmar com certeza que a primeira medida de tempo tomada numa certa direção de polarização se relaciona com a primeira tomada na outra direção de polarização.

No método chamado de sequencial o conjunto de medidas é tomado na sua totalidade, em cada direção de polarização, ou seja, foram tomadas 30 (trinta) medidas numa direção de polarização, em seguida outras 30 (trinta) medidas na segunda direção de polarização.

3.4.3 Justificativa da escolha do método adequado

A tabela a seguir mostra como, em média se comportou a variação das medidas de tempo de percurso, com a finalidade de esclarecer sobre a influência de possíveis erros associados ao método de captura dos sinais.

Tabela 03 : Variação das medidas de tempo de percurso (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

CORRELAÇÃO CRUZADA						
Método par a par						
	Face I		Face II		Face III	
	Polarização		Polarização		Polarização	
	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2
MÉDIA	22022	22020	21894	21893	21983	21984
DES VIO PADRÃO	9	8,2	73	72	68	68
Método Sequencial						
	Face I		Face II		Face III	
	Polarização		Polarização		Polarização	
	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2
MÉDIA	21883	21882	21999	21986	21895	21899
DES VIO PADRÃO	4	1,1	2,3	5,1	1,8	0,8
FFT						
Método par a par						
	Face I		Face II		Face III	
	Polarização		Polarização		Polarização	
	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2
MÉDIA	21963	21970	21915	21925	21951	21950
DES VIO PADRÃO	42	30	14	16	16	18
Método Sequencial						
	Face I		Face II		Face III	
	Polarização		Polarização		Polarização	
	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2	t(ns) Direção 1	t(ns) Direção 2
MÉDIA	21894	21890	21901	21895	21897	21904
DES VIO PADRÃO	6,7	1,3	1,3	2,3	1,7	2,3

A conclusão a que se chegou foi que o método sequencial fornece diferenças médias entre as medidas dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas tomadas em direções ortogonais na mesma ordem de grandeza. Porém, os desvios-padrão associados às medidas tomadas desta forma são menores, o que denota melhor exatidão para a tomada de dados por este método.

Um fator ao qual podemos associar este aspecto positivo do conjunto de medidas tomado de maneira sequencial é que a ortogonalidade pode ser mantida, mesmo sendo obtida de modo visual (aproximado), já que uma vez posicionado o transdutor para uma sequência de medidas, será mantido da mesma maneira até o final das tomadas. Portanto, mesmo que a ortogonalidade seja aproximada, não haverá variação desta (ou será bem pequena), se comparado ao fato de que no método par a par haveria variação desta posição tantas vezes quantos pares fossem tomados para compor o conjunto de dados (no caso, trinta posições ortogonais que dificilmente seriam idênticas, tendo em vista não haver instrumento que garantisse a posição do transdutor diante de tantas variações).

Desta forma, optou-se pelo método sequencial que, além do que foi exposto, também se mostrou mais rápido na obtenção das medidas.

3.5 MEDIDA DOS TEMPOS DE PERCURSO DA ONDA ULTRASSÔNICA NO BLOCO DE ALUMÍNIO

Os tempos de percurso das ondas ultrassônicas foram obtidos de formas ligeiramente distintas, e que serão diferenciadas na sequência do texto. No entanto foi feito uso de um aparato experimental conforme ilustram as figuras (16) e (17), comum a todas as etapas, os quais são enumerados a seguir:

- Osciloscópio de resolução 300 MHz, marca Tektronix, modelo DPO-3032
- Software Tek OpenChoice que comunica o osciloscópio e o computador
- Aparelho gerador de ondas ultrassônicas, marca Panametrics, modelo xxx
- Transdutor de onda ultrassônica longitudinal, marca Panametrics, modelo A109S
- Transdutor de onda ultrassônica transversal, marca Panametrics, modelo V155
- Filtro de sinais

- Computador
- Termômetro digital, marca TESTO, modelo 177-T3
- Conectores específicos para união dos elementos



Figura 16: Aparato Experimental (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

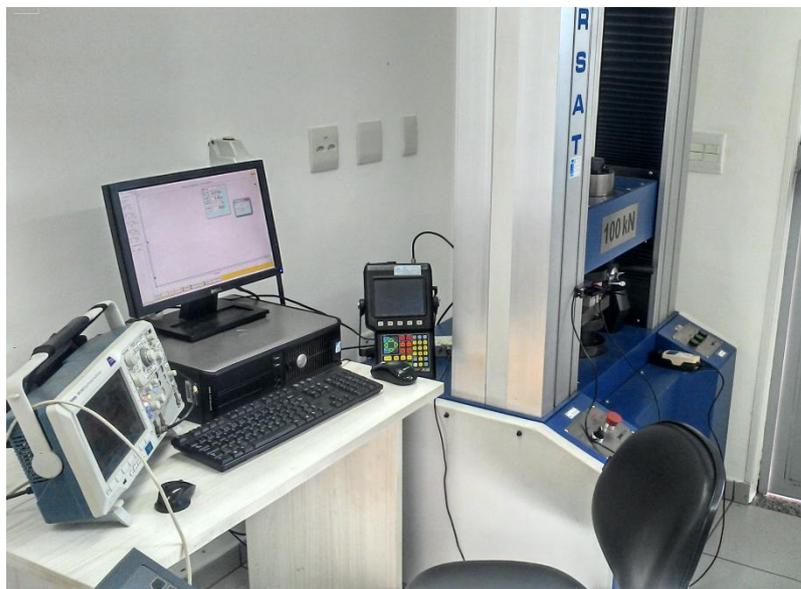


Figura 17: Aparato Experimental (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

3.5.1. Medida dos tempos de percurso da onda ultrassônica no bloco isento de carregamento

As medidas dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas foram realizadas pelas 2 técnicas que seguem abaixo:

3.5.1.1 Medida dos tempos de percurso da onda ultrassônica no bloco isento de carregamento pela técnica da correlação.

Levando-se em conta as três dimensões do bloco, nesta etapa do experimento foram tomadas 60 medidas, pelo método sequencial, usando o transdutor de onda transversal, onde este total foi composto de dois grupos de 30 medidas. O primeiro grupo de medidas é obtido posicionando-se o transdutor conforme figura (18) abaixo



Figura 18: Posicionamento do cabeçote método de captura do sinal sequencial (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

O segundo grupo de medidas foi obtido girando-se o transdutor 90° em relação ao plano de acoplamento com a face em que está em contato figura (19)



Figura 19: Posicionamento do cabeçote a 90° método de captura do sinal sequencial (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

Além das medidas com ondas transversais, também foram tomadas mais 30 medidas com ondas longitudinais, tendo em vista que a característica desse tipo de onda não prevê variação de velocidade por conta do posicionamento do feixe ultrassônico, logo não sofre qualquer efeito resultante por não ser possível variar sua polarização.

O elemento diferente no aparato experimental considerado para executar a medida consta a seguir:

- Software Chronos v.10

O software Chronos. v.10 desenvolvido em LabView, utiliza a técnica da correlação cruzada para fornecer uma medida precisa do tempo de percurso da onda ultrassônica, conforme explicado por Lamy et al. [17], picos da onda ultrassônica que interage com o material, consecutivos ou não.

O osciloscópio utilizado no experimento é capaz de plotar o sinal ultrassônico em sua tela com discretização de 100.000 pontos. Esta informação gráfica é convertida em tabela de

extensão Excel, que é processada pelo software. Portanto cada um dos sinais lidos pelo software é composto por conjuntos de 100.000 pares de informações.

Para fins de valorização da tomada de dados, todos os trabalhos anteriores do LABUS em estudo de análise de tensões foram realizados com sinais discretizados com 10.000 pontos.

O software Chronos. v.10 dá como resposta um arquivo de extensão .txt com 30 valores de tempo de percurso da onda ultrassônica no material. Cada um desses valores é consequência da aplicação da técnica da correlação cruzada num sinal discretizado com 100.000 pontos.

3.5.1.2 Medida dos tempos de percurso da onda ultrassônica no bloco isento de carregamento pela técnica da frequência [16]

A aquisição de dados nesta etapa é feita de modo similar a técnica do tempo. Porém na técnica da frequência, o elemento que proporciona a análise é matemático, a FFT (*Fast Fourier transform* ou, em português *transformada rápida de Fourier*), acessada como função diretamente pelo acionamento de teclas do osciloscópio, não necessitando de software adicional para o tratamento dos dados obtidos com base no tempo figuras (20) e (21).

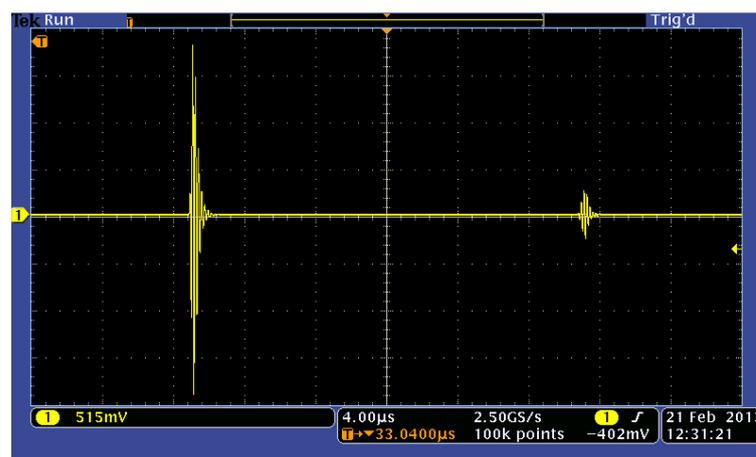
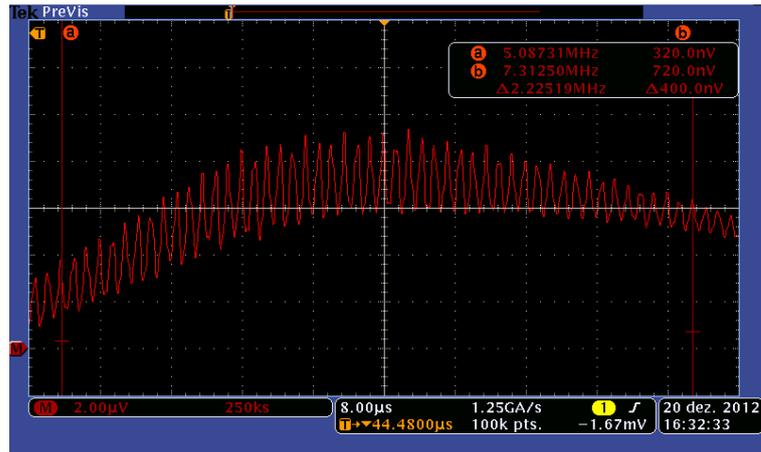


Figura 20: Sinal da onda ultrassônica com o domínio no tempo. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

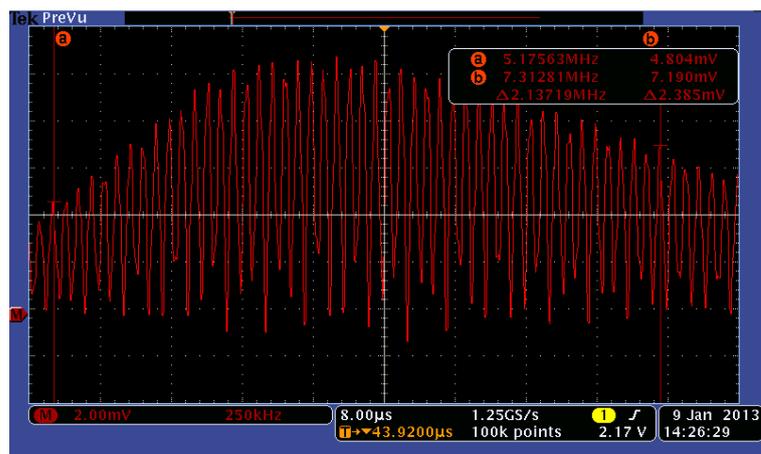


DPO3032 - 16:47:50 20/12/2012 T=20,2

Figura 21: Sinal da onda ultrassônica com o domínio na frequência. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

Conforme explicado em [18] podemos retirar a informação do tempo de percurso de uma onda ultrassônica do sinal no domínio da frequência, transformado pela FFT.

Em suma, para cada sinal coletado no domínio do tempo haverá uma FFT associada, da qual será retirada por contagem simples o valor do tempo de percurso da onda ultrassônica no bloco na direção considerada, respeitando-se o número de picos plotados na tela do osciloscópio e salvos como arquivo de extensão.bmp, de onde será feita uma média aritmética simples com origem no total de picos e intervalo de frequência associado. A figura (22) elucida a forma simples como é tratada a FFT para a retirada da informação do tempo percurso da onda ultrassônica no bloco.



DPO3032 - 14:42:35 9/1/2013 T=20,0

Figura 22: Leitura do sinal ultrassônico feita através da FFT. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

Tomando-se por referência os cursores a e b da figura (22), contamos o número de intervalos entre os picos que compõem a figura entre os cursores. O valor associado à letra Δ na figura corresponde a um intervalo de frequência contido na FFT do sinal no tempo. Portanto a FFT faz a passagem da representação do sinal no domínio do tempo para um sinal no domínio da frequência. Segundo o que foi mostrado [18] cada intervalo ou diferença de frequências do sinal transformado pela FFT corresponde exatamente ao tempo de percurso da onda ultrassônica no material. Por se tratar de uma forma experimental de medida de tempo, possui incertezas associadas à sua leitura na tela do aparelho, e que neste trabalho é distribuída no elevado número de repetições daqueles picos. No exemplo da figura temos 47 intervalos (em 48 picos) e um Δ igual a 2,13719 MHz. Efetuando o quociente do valor de frequência pelo número de intervalos e invertendo este resultado [1/Hz], encontramos um resultado [s] equivalente ao valor do tempo de percurso da onda ultrassônica no material (21991 ns neste exemplo).

Vale ressaltar, ainda, que no uso da técnica da frequência os sinais obtidos, tanto com base no tempo quanto na FFT, também foram discretizados com 100.000 pontos.

3.5.2 Medida dos tempos de percurso da onda ultrassônica no bloco durante aplicação de carga

Nesta fase do experimento foram repetidas as etapas descritas em 3.4.1.1 e 3.4.1.2 em apenas uma das faces, com a ressalva de que foram aplicadas cargas estáticas de 30 kN (kilonewtons), 35 kN, 40kN, 45kN e 50kN.

O equipamento utilizado para aplicar carga no bloco durante o experimento consiste em uma Máquina universal de ensaios, fabricante PANAMBRA (100kN), usada no modo compressão com auxílio do software Panambra para fixação dos parâmetros

Esta etapa do trabalho foi realizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LABEM) da empresa Qualival Indústria Comércio e Manutenção Industrial LTDA.

A partir das condições de ensaio verificadas nas etapas experimentais do bloco sem carregamento, foi preparada a segunda etapa da tomada de dados com preocupação de avaliar cuidadosamente se máquina universal de ensaios sofreria variação considerável da carga ao longo deste processo de prensagem do bloco de alumínio. O software de controle da máquina

universal de ensaios é capaz de fornecer leitura digital contínua da força aplicada pela célula de carga ao bloco, e uma tabela foi montada (tabela (04)) visando ter a mínima influência de possíveis variações de carga durante as medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica que serão discutidas também na parte final deste trabalho.

Tabela 04: Verificação das condições experimentais. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

CORRELAÇÃO CRUZADA		FFT		TOTAIS OTIMIZADOS*
Uma tomada de tempo na direção 1 ou 2	< 1 min	Uma tomada de tempo na direção 1 ou 2	< 5 min	< 10 min
10 tomadas de tempo na direção 1 ou 2	< 5 min	10 tomadas de tempo na direção 1 ou 2	< 15 min	< 25 min
30 tomadas de tempo na direção 1 ou 2	< 10 min	30 tomadas de tempo na direção 1 ou 2	< 30 min	< 60 min

3.6 AVALIAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS EM COMPARAÇÃO AS PROPRIEDADES FÍSICAS.

A tomada sistemática de dados de tempo de percurso de ondas ultrassônicas no bloco de alumínio em todas as direções, usando-se ondas de compressão e cisalhantes, para estudo de situação limítrofe, que é a análise do estado de tensão ao qual está submetido um corpo representa situação de alta dificuldade detecção de diferenças de tempo da ordem de nanosegundos, mesmo para instrumentos tão modernos quanto os utilizados neste trabalho. Falta de acoplamento do transdutor no corpo em estudo, rugosidade ou falhas nas superfícies em contato, podem provocar erros que comprometem a precisão da análise de tempo desejada.

Outra questão relevante é a escassez de modelos teóricos gerais que possam ser utilizados no estudo de tensão como característica obtida da interação de onda ultrassônica com o material.

Além disso, outro experimento como este dá maior base para a comparação de técnicas (do tempo e da frequência), já que foi assumido que para este trabalho a técnica de referência é a técnica do tempo, porém não há para este tipo de análise referências

experimentais que possam ser consideradas absolutas de tempo de percurso de ondas ultrassônicas além das teóricas encontradas na literatura.

Com o intuito de dar consistência e confiabilidade ao conjunto de dados tomados sistematicamente neste trabalho, foi procurado na literatura algum estudo físico de propriedades de materiais que se valesse da interação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais. Foi encontrado [19] um conjunto de equações que descrevem módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e módulo de Poisson a partir da densidade do material, conforme é mostrado:

$$E = \rho v_T^2 [4 - 3(v_L/v_T)^2] / [1 - (v_L/v_T)^2] \quad (20)$$

$$G = \rho v_T^2 \quad (21)$$

$$\nu = [2 - (v_L/v_T)^2] / [2 - 2(v_L/v_T)^2] \quad (22)$$

Comparando com os valores encontrados na literatura [20], é possível notar a concordância entre eles, o que dá confiabilidade, por concordar com um modelo físico de domínio científico de área do conhecimento intimamente ligada com os objetivos deste trabalho de dissertação.

3.7 AVALIAÇÃO DA TOMADA DE DADOS POR MÉTODO ESTATÍSTICO

Uma etapa de tratamento estatístico ao conjunto de dados das medidas de tempo foi executada com o intuito de mostrar que um número de repetições num experimento pode ser suficiente numa comprovação científica. Por isso também procuramos dar validade à tomada de dados pela análise amostral e avaliação estatística do conjunto de dados tomados neste trabalho.

Com o apoio do software MiniTab 16 puderam ser realizadas as avaliações de precisão, acurácia e poder dos testes comparativos, afinal num trabalho científico é de extrema importância saber se a quantidade de repetições realizadas foi conveniente para se ter uma análise confiável.

Planejar experimentos futuros também pode ter abordagem estatística, onde se pode determinar com quantas repetições pode-se obter adequação de determinado experimento, evitando excessivo esforço e horas adicionais em laboratório que não garantiriam ganhos expressivos na confiabilidade estatística do trabalho, ao se avaliar um quesito importante como o poder de teste.

Neste trabalho a avaliação estatística foi fundamental para o cumprimento do objetivo principal, que é a comparação das medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas pelas técnicas do tempo (correlação cruzada) e da frequência (FFT). Com o software MiniTab 16 os conjuntos de dados foram avaliados nas médias, desvios-padrão e poder de teste, o que permitiu uma ampla discussão sobre precisão, exatidão e diferença, sob o ponto de vista estatístico, das técnicas empregadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo deste capítulo serão analisados os resultados encontrados das medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas aplicadas ao bloco de alumínio pelas técnicas da correlação cruzada e da FFT

Conforme já foi evidenciado no capítulo 3, o experimento foi composto de várias etapas as quais serão detalhadas e discutidas neste capítulo. Cada resultado será analisado separadamente, assim como destacada a sua importância no contexto global do trabalho.

4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO BLOCO DE ALUMÍNIO

A densidade do bloco de alumínio foi obtida conforme descrito em 3.3 e o resultado obtido foi aplicado no item 3.6. A razão deste experimento foi inserir um dado real para a comparação com o modelo físico encontrado na literatura [19].

Portanto, encontrou-se para a densidade o valor de $2,51 \pm 0,01 \text{g/cm}^3$. Este valor foi utilizado nas equações apresentadas em 3.6. Na literatura [21] encontramos para a liga de alumínio 6351 densidade na faixa de 2,6-2,8 g/cm^3 .

4.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DOS TEMPOS DE PERCURSO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS

Levando-se em conta as tomadas de dados realizadas em 3.4, foram testadas as metodologias de aquisição dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas (par a par e sequencial). Assim, foi utilizado o método de aquisição sequencial, conforme justificado em 3.4.3, onde foi mostrada boa adequação para continuidade dos experimentos

4.3.1 Tempos de percurso das ondas ultrassônicas sem aplicação de carga

Esta etapa experimental foi cumprida já com o objetivo principal de comparar as técnicas de medida dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas aplicadas ao bloco de alumínio. Os resultados aqui apresentados foram consequência das etapas seguidas em 3.5.1 e, portanto, permitiram comparar as técnicas de medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas (da correlação cruzada e da frequência).

É importante ressaltar que a comparação proposta considera como referência os tempos obtidos pela técnica da correlação cruzada, neste caso a descrita em 3.5.1.1. Uma razão importante para a escolha da técnica da correlação cruzada como referência é o fato de ter sido mais amplamente estudada e aplicada em trabalhos do LABUS [22][23][24] em análise de tensões, onde se mostrou bastante eficaz.

A tabela a seguir mostra o comportamento médio dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes aplicadas ao bloco de alumínio ainda sem carregamento mecânico. As tabelas completas de dados encontram-se no ANEXO 01.

Tabela 05: Comportamento médio dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

CORRELAÇÃO CRUZADA				
	POLARIZAÇÃO	MÉDIA (s)	DES VIO-PADRÃO (s)	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
TEMPO-EIXO I (s)	Direção 1	4,39288E-05	1,8E-08	1,3E-02
	Direção 2	4,44990E-05	5,9E-09	
TEMPO-EIXO II (s)	Direção 1	4,43075E-05	3,1E-09	5,7E-03
	Direção 2	4,45607E-05	3,1E-09	
TEMPO-EIXO III (s)	Direção 1	4,41945E-05	2,3E-09	-3,0E-03
	Direção 2	4,40629E-05	6,4E-10	
FFT				
	POLARIZAÇÃO	MÉDIA (s)	DES VIO-PADRÃO (s)	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
TEMPO-EIXO I (s)	Direção 1	4,38147E-05	6,1E-09	1,2E-02
	Direção 2	4,43530E-05	6,7E-09	
TEMPO-EIXO II (s)	Direção 1	4,41290E-05	1,4E-09	5,0E-03
	Direção 2	4,43480E-05	7,0E-09	
TEMPO-EIXO III (s)	Direção 1	4,40396E-05	2,2E-09	1,3E-02
	Direção 2	4,46248E-05	2,2E-09	

A partir do conjunto de dados medidos no bloco isento de carregamento pode-se inferir, com base na verificação dos valores das birrefringências acústicas calculadas, que o bloco é anisotrópico[25].

Outro resultado importante deste conjunto de medidas é a semelhança dos valores médios medidos pelas duas técnicas, ressaltando-se os conjuntos de dados referentes aos eixos I e II do bloco, onde eles menos diferem entre si nesta primeira verificação. Para comprovar este fato será feita adiante a análise estatística.

Sobre a precisão dos dados apresentados, é relevante informar que foram expressas com todas as casas decimais fornecidas pelos instrumentos e softwares utilizados nos estudos. Por se saber do grau de sensibilidade desejado para que as medidas fossem consideradas satisfatórias (na ordem de nanossegundo), quando oportuno, foi usado apenas arredondamento simples. Em todos os casos a instrumentação envolvida neste trabalho forneceu leituras, por vezes, em ordem de grandeza menor do que o necessário, o que poderia ser questionável do ponto de vista matemático. Porém a justificativa para o fato de serem apresentados números expressos com muitas casas decimais está no alto grau de discretização possível conjugando-se os recursos computacionais presentes no osciloscópio e também no computador de 64 bits.

4.3.2 Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com aplicação de carga

Já nesta etapa experimental o objetivo principal de comparar as técnicas de medida dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas (da correlação cruzada e da frequência) aplicadas ao bloco de alumínio também foi cumprido. Além disso, foi testada a capacidade do aparato experimental perceber mudanças nos tempos de percurso em decorrência da presença de tensão aplicada em carregamento mecânico estático no regime elástico do material estudado, ou seja, a sensibilidade do sistema. Os resultados aqui apresentados foram consequência das etapas seguidas em 3.5.2.

Da mesma forma que em 4.3.1, tem-se como referência a tomada de dados feita pela técnica da correlação cruzada descrita em 3.5.1.1.

As tabelas a seguir mostram o comportamento médio das ondas ultrassônicas aplicadas ao bloco de alumínio com carregamentos mecânicos estabelecidos para o regime elástico do material em estudo. As tabelas completas de dados encontram-se no ANEXO 02.

Tabela 06: Comportamento médio das ondas ultrassônicas aplicadas ao bloco com carregamento. (da SILVA NETO, Ramiro, 2014)

CORRELAÇÃO CRUZADA

	POLARIZAÇÃO	MÉDIA (s)	DESVIO-PADRÃO (s)	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
TEMPO-EIXO II (s) 30kN	Direção 1	4.43424E-05	2.2E-09	6.6E-03
	Direção 2	4.46380E-05	8.5E-08	
TEMPO-EIXO II (s) 35kN	Direção 1	4.44891E-05	1.1E-07	6.3E-03
	Direção 2	4.47703E-05	3.4E-09	
TEMPO-EIXO II (s) 40kN	Direção 1	4.45536E-05	6.9E-10	5.0E-03
	Direção 2	4.47768E-05	1.5E-10	
TEMPO-EIXO II (s) 45kN	Direção 1	4.45527E-05	2.4E-10	5.0E-03
	Direção 2	4.47780E-05	3.4E-09	
TEMPO-EIXO II (s) 50kN	Direção 1	4.45673E-05	6.6E-10	5.3E-03
	Direção 2	4.48062E-05	3.9E-09	

FFT

	POLARIZAÇÃO	MÉDIA (s)	DESVIO-PADRÃO (s)	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
TEMPO-EIXO II (s) 30kN	Direção 1	4.40741E-05	3.6E-09	8.4E-03
	Direção 2	4.44466E-05	1.8E-09	
TEMPO-EIXO II (s) 35kN	Direção 1	4.43621E-05	1.6E-09	4.2E-03
	Direção 2	4.45468E-05	3.7E-09	
TEMPO-EIXO II (s) 40kN	Direção 1	4.42672E-05	1.4E-09	2.0E-03
	Direção 2	4.43555E-05	1.9E-09	
TEMPO-EIXO II (s) 45kN	Direção 1	4.43481E-05	1.8E-09	1.9E-03
	Direção 2	4.44316E-05	3.0E-09	
TEMPO-EIXO II (s) 50kN	Direção 1	4.45026E-05	2.5E-09	4.9E-03
	Direção 2	4.47250E-05	3.1E-09	

A partir do conjunto de dados medidos no bloco com carregamento podem-se fazer algumas considerações sobre o que o conjunto de medidas proporciona analisar:

- a. Para medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas feita pela técnica da frequência (FFT) o sistema se mostrou capaz de perceber mudanças nesses tempos de percurso em decorrência da aplicação de carga estática dentro do regime elástico;
- b. Assim como a técnica da correlação cruzada, a técnica da frequência é capaz de realizar medidas de tempo de percurso de ondas ultrassônicas; e
- c. Analisando-se apenas os valores dos desvios-padrão obtidos das medidas pela técnica da frequência, verificamos uma maior estabilidade deste conjunto de medidas, o que pode ser percebido no fato de a ordem de grandeza desses valores praticamente não variar. Na técnica da correlação cruzada os desvios-padrão de cada conjunto de medida variam muito mais se comparados entre si.

4.4 DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS A PARTIR DE COMPARAÇÃO COM MODELO FÍSICO.

Conforme a etapa experimental descrita em 3.6, um modelo físico encontrado na pesquisa bibliográfica serviu de base para a utilização das medidas de tempos de percurso das ondas ultrassônicas [1]. Abaixo estão as equações já apresentadas em 3.6 e que correspondem ao modelo físico do qual será feito uso:

$$E = \rho v_T^2 [4 - 3(v_L/v_T)^2] / [1 - (v_L/v_T)^2] \quad (20)$$

$$G = \rho v_T^2 \quad (21)$$

$$v = [2 - (v_L/v_T)^2] / [2 - 2(v_L/v_T)^2] \quad (22)$$

O uso deste modelo foi uma forma de checar a validade dos dados coletados. Para completar todas as grandezas que compunham as equações foi necessário medir o espaço percorrido pelas ondas ultrassônicas no bloco de alumínio figuras (23), (24) e (25), a densidade do bloco (conforme visto em 4.2), além de serem tomados valores dos tempos de

percurso de ondas ultrassônicas longitudinais (uma vez que as medidas de tempo das ondas cisalhantes já haviam sido obtidas), conforme tabela (07).

Vale ressaltar que os valores não apresentados nas tabelas citadas estão contidos no ANEXO 01.

Os tempos de percurso das ondas longitudinais foram obtidos com o auxílio do software Chronos v.10, em quantidade de 30 medidas.

Tabela 07: Tempos médios de percurso de onda longitudinal. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

TEMPOS MÉDIOS DE PERCURSO DE ONDA LONGITUDINAL		
Face I	Face II	Face III
2.20218E-05	2.20383E-05	2.20115E-05

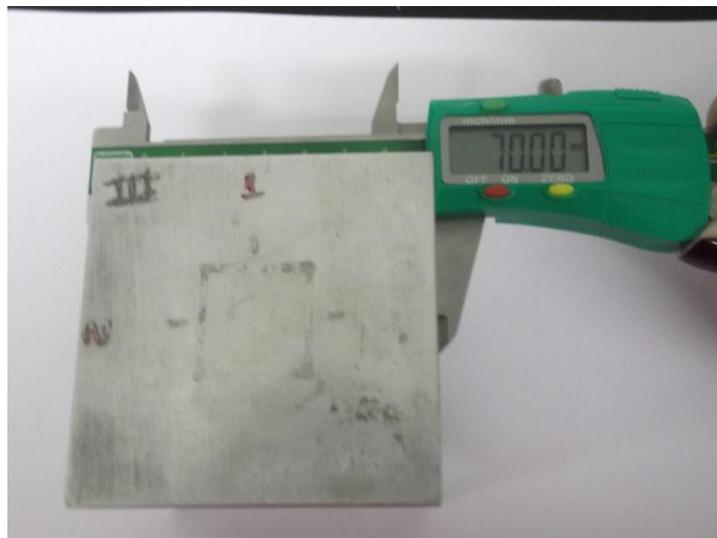


Figura 23: Verificação do espaço percorrido pela onda ultrassônica. Bloco de alumínio A6351. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

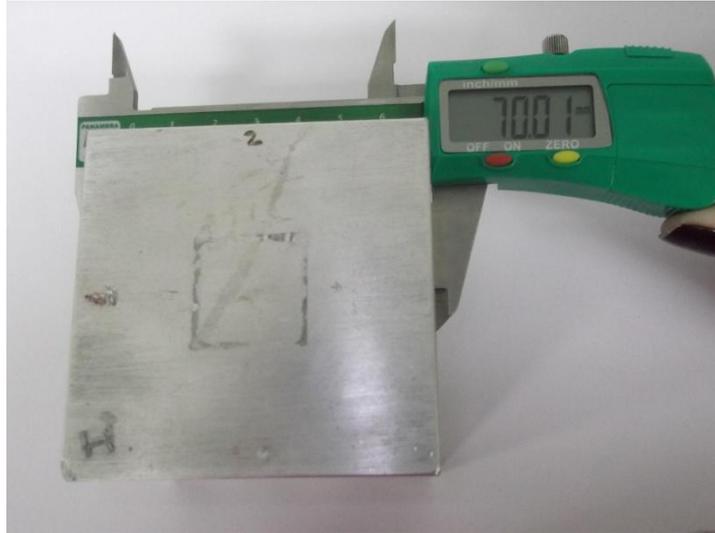


Figura 24: Verificação do espaço percorrido pela onda ultrassônica. Bloco de alumínio A6351. (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



Figura 25: Verificação do espaço percorrido pela onda ultrassônica. Bloco de alumínio A6351. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

A partir dos dados coletados de tempos de percurso das ondas ultrassônicas transversais e longitudinais, bem como das medidas experimentais complementares, pôde ser verificada a validade das equações que descrevem o meio físico escolhido. Os resultados

calculados pelas duas técnicas (correlação cruzada e FFT) estão apresentados na tabela 08, e pode ser comparado com valores encontrados na literatura [20] também apresentados.

Na tabela abaixo temos expressas as grandezas ΔS_{us} (espaço percorrido pela onda ultrassônica no bloco), t_{D1} (tempo de percurso da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 1), t_{D2} (tempo de percurso da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 2), t_L (tempo de percurso da onda ultrassônica longitudinal), $v_{T D1}$ (velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 1), $v_{T D2}$ (velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 2), v_L (velocidade da onda ultrassônica longitudinal), E_1 (limite de escoamento calculado com o valor velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 1), E_2 (limite de escoamento calculado com o valor velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 2), E_{LIT} (limite de escoamento da literatura), G_1 (módulo de cisalhamento calculado com o valor velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 1), G_2 (módulo de cisalhamento calculado com o valor velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 2), G_{LIT} (módulo de cisalhamento da literatura), ν_1 (coeficiente de Poisson calculado com o valor velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 1), ν_2 (coeficiente de Poisson calculado com o valor velocidade da onda ultrassônica transversal na direção de polarização 2), ν_{LIT} (coeficiente de Poisson da literatura).

Vale ressaltar que como são usados valores de velocidade de ondas transversais nos cálculos das propriedades mecânicas, houve a preocupação de resolver as equações duas vezes, levando-se em conta duas direções ortogonais de polarização destas ondas, o que nos forneceu resultados adicionais que valorizaram a comparação com os valores tabelados.

Tabela 08: Resultados das propriedades físicas obtidas com o método da correlação cruzada e FFT em comparação com a literatura. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

CORRELAÇÃO CRUZADA			
FACE II			
$\Delta S_{US}(m)$	$t_{D1}(s)$	$t_{D2}(s)$	$t_L(s)$
7.002E-02	4.431E-05	4.456E-05	2.204E-05
	$V_T D1(m/s)$	$V_T D2(m/s)$	$V_L(m/s)$
	3.161E+03	3.143E+03	6.354E+03
$\rho_{BLOCO}(kg/m^3)$	$E_1(Pa)$	$E_2(Pa)$	$E_{LIT}(Pa)$
	6.706E+10	6.642E+10	7.000E+10
	$G_1(Pa)$	$G_2(Pa)$	$G_{LIT}(Pa)$
2.513E+03	2.510E+10	2.482E+10	2.550E+10
	ν_1	ν_2	ν_{LIT}
	3.356E-01	3.381E-01	3.300E-01

FFT			
FACE II			
$\Delta S_{US}(m)$	$t_{D1}(s)$	$t_{D2}(s)$	$t_L(s)$
7.002E-02	4.413E-05	4.435E-05	2.204E-05
	$V_T D1(m/s)$	$V_T D2(m/s)$	$V_L(m/s)$
	3.173E+03	3.158E+03	6.354E+03
$\rho_{BLOCO}(kg/m^3)$	$E_1(Pa)$	$E_2(Pa)$	$E_{LIT}(Pa)$
	6.751E+10	6.696E+10	7.000E+10
	$G_1(Pa)$	$G_2(Pa)$	$G_{LIT}(Pa)$
2.513E+03	2.531E+10	2.506E+10	2.550E+10
	ν_1	ν_2	ν_{LIT}
	3.339E-01	3.360E-01	3.300E-01

Diante dos resultados apresentados na tabela 08 pôde ser atestada validade dos dados tomados de tempos de percurso das ondas ultrassônicas no bloco de alumínio pelas duas técnicas em estudo.

A semelhança entre os resultados é assumida pelo fato de a literatura referenciada citar a liga de alumínio de modo genérico, que não necessariamente é idêntica a liga 6351 usada neste trabalho. Além disso, também não é citado o processo de fabricação da liga na literatura, o que é de grande relevância para o estudo de tensões. Portanto, a comparação pode ser assumida como boa para continuação do trabalho até as conclusões.

Desta forma, confirma-se a possibilidade de calcular as constantes elásticas de determinado material de modo não destrutivo, ou seja, sem a necessidade de retirada de corpo de prova para a execução de algum ensaio mecânico, tal como normalmente é feito.

O método sugerido traz a possibilidade de ser feita uma medida eficiente, por exemplo, num material (ou peça, ou componente estrutural) onde não seria possível a remoção de uma parte para construção de corpo de prova por conta de indisponibilidade do material original.

4.5 DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS A PARTIR DE RECURSOS ESTATÍSTICOS

Neste trabalho, além do apoio do modelo físico descrito em 3.6 e 4.4, foi utilizada uma abordagem estatística como forma de justificar a adequação da quantidade de medidas tomadas para o experimento principal de comparação de técnicas de medida de tempo de percurso de ondas ultrassônicas.

4.5.1 O software utilizado e seus recursos

O software utilizado foi o Minitab[®] 16, cuja licença fora adquirida pelo Departamento de Materiais do IEN e disponibilizado para o experimento do LABUS. Trata-se de um programa que abrange a maior parte dos recursos da ciência estatística, de domínio público, sendo comumente usado em trabalhos acadêmicos, embora sem licença livre.

Na comparação dos conjuntos de dados o software pôde traçar um diagnóstico estatístico. Os recursos acessados avaliaram o poder de diferenciação a cada dois conjuntos de medidas escolhidos levando-se em conta as técnicas da correlação cruzada e da FFT. Além disso, foi avaliado o poder do teste, recurso que o software fornece com a finalidade de dizer com qual nível de certeza determinado conjunto de medidas pode ser diferenciado, na unidade em que foram feitas as medidas.

Em 4.5.2 pode-se ver os resultados fornecidos pelo software Minitab[®] 16 e entender melhor os seus significados, sem prejuízo da discussão.

4.5.2 Análise comparativa dos resultados

Agora serão apresentados os resultados efetivos fornecidos pelo software Minitab[®] 16 a partir dos conjuntos de 30 trinta medidas tomadas para cada situação considerada. Além disso, serão representados graficamente os conjuntos de medidas e suas médias.

Desta forma as técnicas da correlação cruzada e da FFT podem ser comparadas de forma qualitativa e quantitativa.

O primeiro conjunto de dados é referente à face II, levando-se em conta as duas direções de polarização, e ainda sem carregamento. É importante lembrar que nesta fase do experimento foram tomadas medidas nas três faces, ou seja, ao longo dos três eixos de simetria do bloco de alumínio, e as medidas das faces I e III estão apresentadas no ANEXO 02. A face II foi escolhida por ter apresentado, de modo geral, as menores variações nos conjuntos de medidas, o que foi considerado como quesito importante, já que o objetivo principal era analisar as variações decorrentes das tensões aplicadas com o carregamento. Portanto, esta foi a face escolhida para ser feito o monitoramento dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas também durante o carregamento, como será mostrado posteriormente.

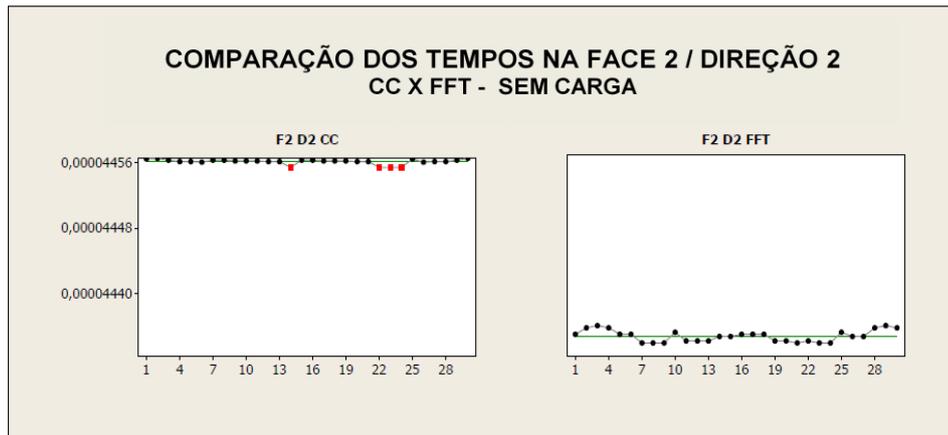
Os gráficos e tabelas a seguir expressam os resultados do tratamento estatístico do software ao comparar as duas técnicas em estudo numa determinada situação que fora interessante do ponto de vista experimental. Foram obtidas as seguintes informações: número de medidas de tempo tomadas pelas duas técnicas, médias e desvios-padrão desses tempos medidos, a diferença entre as médias, a variação da carga e da temperatura durante a tomada dos dados e, por fim, o poder do teste, que é um artifício estatístico que mostra o poder de diferenciação entre as medidas tomadas em termos de probabilidade.

Como durante o processo de tomadas de dados, podemos incorrer em vários erros que podem acarretar em incertezas nas medidas encontradas, houve a preocupação de mitigar os erros associados à variação de temperatura e à variação da carga da prensa, situações que comumente ocorrem nesse tipo de experimento e que podem comprometer seu resultado. Por esta razão as variações de carga e de temperatura foram expressas junto ao conjunto de dados



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D1 CC	F2 D1 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	1.4E-09	30	30
70%	1.6E-09	Média	Média
80%	1.8E-09	0.000044308	0.000044129
90%	2.0E-09	DP	DP
Varição da Carga (kN)	Varição da Temperatura (°C)	3.1E-09	1.4E-09
N/A	19.9 - 20.2		
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
1.78538E-07			

Figura 26 : Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	3.16508E-09	30	30
70%	3.55293E-09	Média (s)	Média (s)
80%	4.00686E-09	0.000044561	0.000044348
90%	4.63647E-09	DP (s)	DP (s)
Variação da Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)		
-	20.1 - 20.4	3.10858E-09	6.98351E-09
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
2.12755E-07			

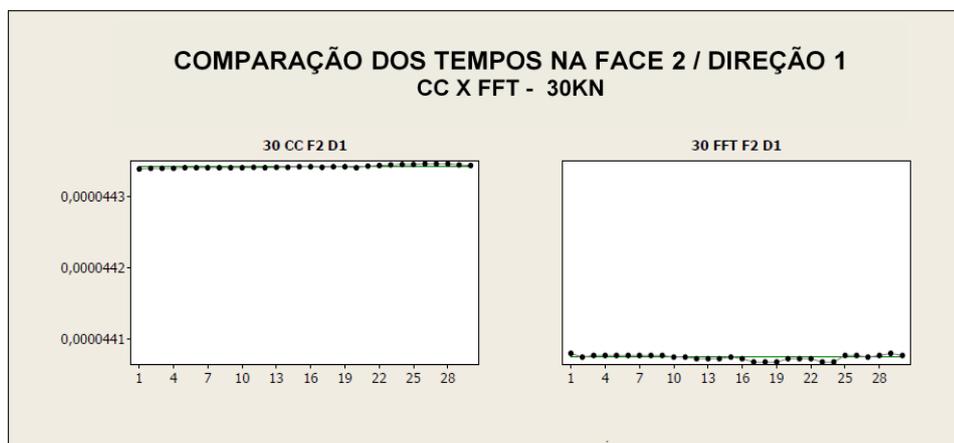
Figura 27: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Sem Carregamento (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)

No primeiro conjunto de medidas, representado pelas figuras (26) e (27) acima, do bloco ainda sem carregamento pode-se notar que, além do poder do teste em diferenciar as medidas com precisão da ordem de nanossegundo, os desvios-padrão calculados concordam com este poder de diferenciação, já que também são expressos na ordem de grandeza de nanossegundo. O desvio-padrão maior no conjunto de dados da técnica da FFT conforme ilustra a figura (27) mostra que houve maior flutuação do conjunto de medidas, mas que não comprometeu o aproveitamento das trinta medidas. O mesmo não ocorreu no conjunto tomado pela técnica da correlação cruzada, onde quatro pontos foram descartados automaticamente pelo software por apresentarem valores muito díspares do conjunto como um todo, não colaborando para o cálculo de média, desvio-padrão e poder do teste. Vale citar

que este é mais um recurso do software e que, em especial, na análise das figuras (26) e (27) o próprio software também realça estes pontos, desenhando-os em vermelho.

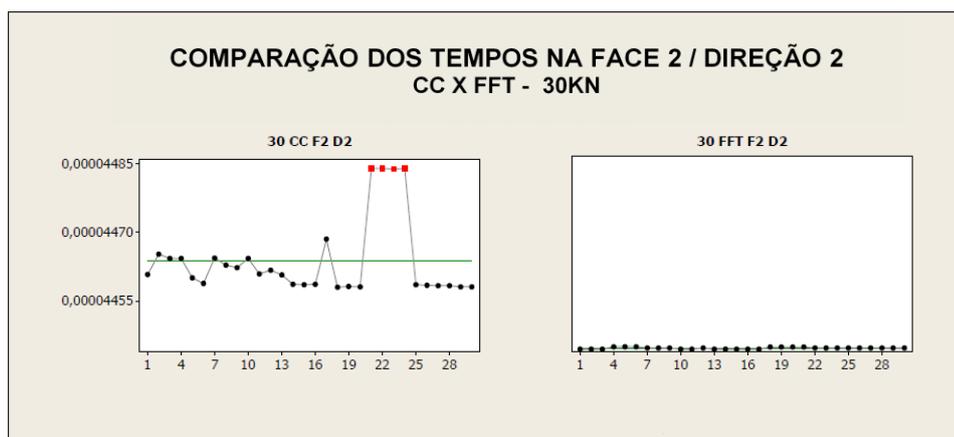
Em seguida será apresentado um conjunto de medidas referentes à face II, levando-se em conta as duas direções de polarização e, agora, com carregamentos estáticos nos valores especificados de acordo com a capacidade da prensa.

A variação da carga, agora relevante, durante a tomada dos dados para as medidas dos tempos estará informada nas tabelas, como elemento adicional para discussão de sua influência no conjunto de medidas e comparação das técnicas.



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D1 CC	F2 D1 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	1.7E-09	30	30
70%	2.0E-09	Média (s)	Média (s)
80%	2.2E-09	0.000044342	0.000044074
90%	2.6E-09	DP (s)	DP (s)
Varição da Carga (kN)	Varição da Temperatura (°C)	2.2E-09	3.6E-09
30.782 - 30.715	20.2 - 20.4	Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)	
2.68335E-07			

Figura 28 : Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 30kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



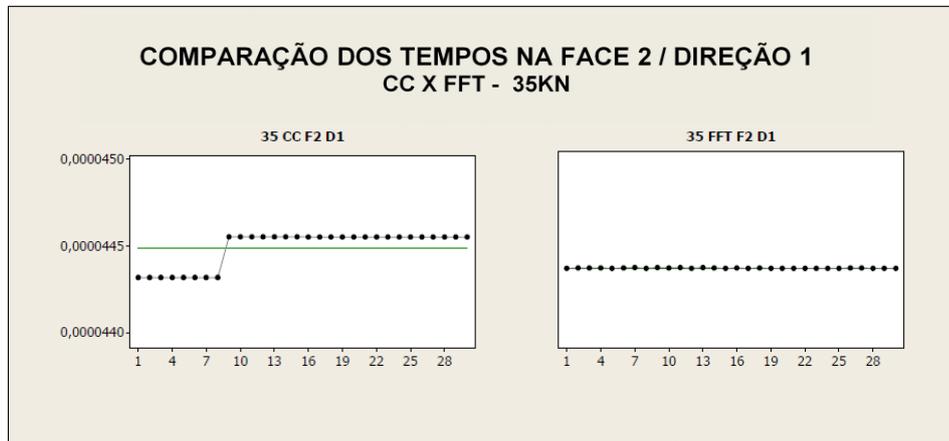
Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	3.5E-08	30	30
70%	4.0E-08	Média (s)	Média (s)
80%	4.5E-08	0.000044638	0.000044447
90%	5.2E-08	DP (s)	DP (s)
Variação da Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)	8.5E-08	1.9E-09
30.763 - 30.756	20.1 - 20.5	Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)	
1.91336E-07			

Figura 29: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 30kN (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

Nas figuras (28) e (29), relativas ao carregamento de 30kN, pode-se notar que na direção de polarização 1 (F2D1) as duas técnicas em estudo respondem bem segundo o quesito da estabilidade, tendo em vista seus baixos valores de desvio-padrão e poder do teste. Além disso, nenhum ponto foi descartado do conjunto de medidas, o que também reforça o argumento da estabilidade das medidas.

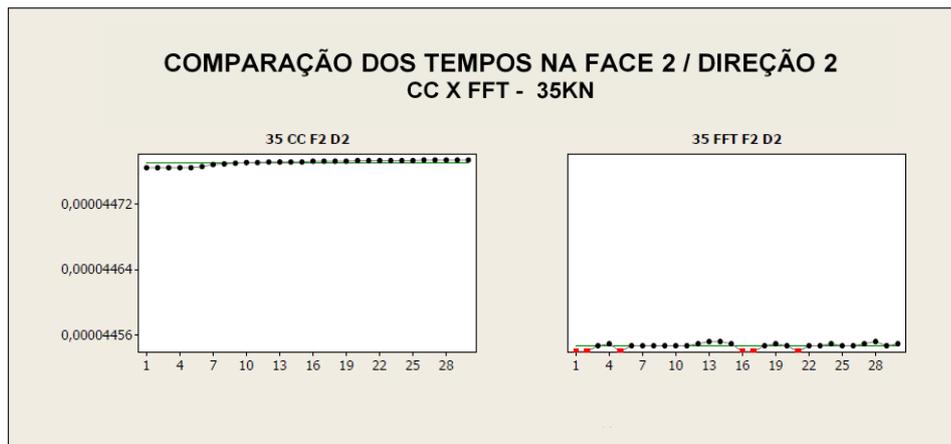
Já na direção de polarização 2, é nítida a instabilidade associada à tomada de dados pela técnica da correlação cruzada, onde também quatro pontos foram descartados automaticamente pelo software. E ainda os desvios-padrão encontrados são bastante diferentes, o que comprometeu o poder de diferenciação do teste com a subida de pelo menos uma ordem de grandeza.

Nesta etapa do ensaio destaca-se positivamente a estabilidade mantida na tomada de tempos pela técnica da FFT, que também colaborou com todos os trinta pontos medidos nos cálculos estatísticos.



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D1 CC	F2 D1 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	4.4E-08	30	30
70%	4.9E-08	Média (s)	Média (s)
80%	5.6E-08	0.000044489	0.000044362
90%	6.4E-08	DP (s)	DP (s)
Variação de Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)	1.1E-07	1.6E-09
35.683 - 35.675	20.1 - 20.5	Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)	
1.27038E-07			

Figura 30: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 35 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



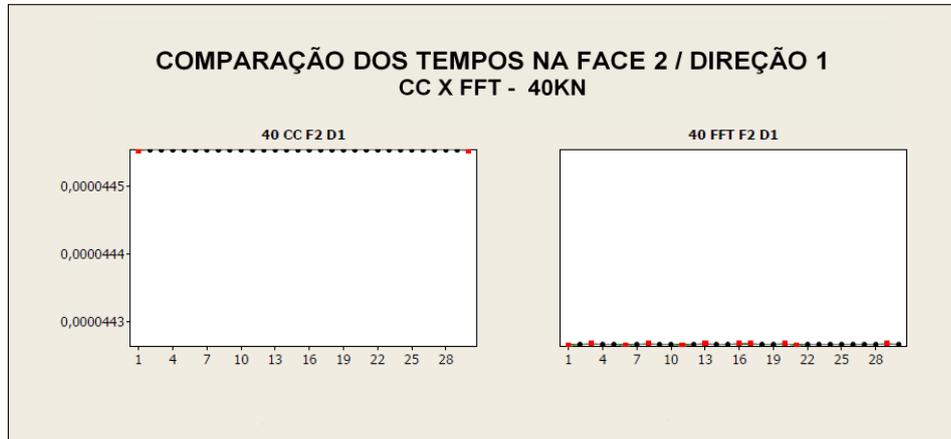
Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	2.1E-09	30	30
70%	2.3E-09	Média (s)	Média (s)
80%	2.6E-09	0,000044770	0.000044547
90%	3.0E-09	DP (s)	DP (s)
Variação da Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)	3.4E-09	3.7E-09
35.786 - 35.752	20.2 - 20.5	Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)	
2.23584E-07			

Figura 31 : Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 35 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)

Já nas figuras (30) e (31), relativas ao carregamento de 35kN, pode-se notar que na direção de polarização 1 (F2D1) também há uma instabilidade na tomada de dados pela técnica da correlação cruzada, o que não ocorre, na técnica da FFT. Desta forma, ambas as técnicas colaboram com todos os tempos medidos pelo aparato experimental. No entanto, a instabilidade de ocorrência mais uma vez na técnica da correlação cruzada comprometeu não só o desvio-padrão a ela associado, mas também o poder do teste uma vez que ocorreu um aumento desses valores. Ainda assim vale ser destacado positivamente o fator estabilidade observado na técnica da FFT.

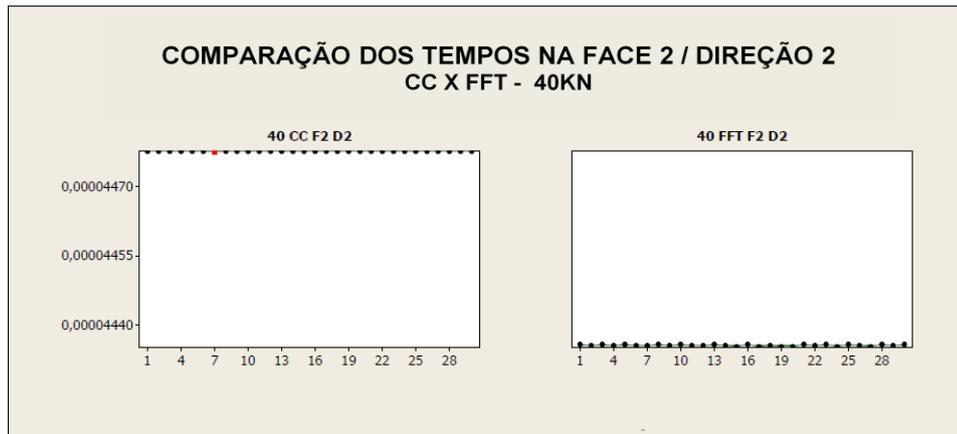
Na direção de polarização 2 as duas técnicas respondem bem sob o critério de estabilidades. Embora pela técnica da frequência seis pontos tenham sido descartados automaticamente pelo software, os desvios-padrão, bem como o poder do teste, são

satisfatórios, já que não possuem elementos que podem ser estimadamente associados a algum prejuízo dos cálculos estatísticos, e fornecem valores na ordem de nanossegundo.



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D1 CC Nº de medidas	F2 D1 FFT Nº de medidas
60%	5.86224E-10	30	30
70%	6.58081E-10	Média (s)	Média (s)
80%	7.42187E-10	0,000044554	0.000044267
90%	8.58854E-10	DP (s)	DP (s)
Variação da Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)	3.0E-10	1.4E-09
40.185 - 40.090	19.9 - 20.1		
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
2.86296E-07			

Figura 32: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 40 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	7.9E-10	30	30
70%	8.9E-10	Média (s)	Média (s)
80%	1.0E-09	0,000044777	0.000044356
90%	1.2E-09	DP (s)	DP (s)
Variação da Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)	1.5E-10	1.9E-09
40.593 - 40.231	19.9 - 20.2	Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)	
4.21233E-07			

Figura 33: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 40 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014).

Seguindo a análise, nas figuras (32) e (33), relativas ao carregamento de 40kN, são observados fenômenos diferentes na tomada de dados. Verifica-se que há certa estabilidade nas tomadas de tempos pelas duas técnicas, em ambas as direções de polarização, mesmo levando-se em conta os pontos descartados pelo software. Porém nota-se que pela técnica da correlação cruzada o desvio padrão está uma ordem de grandeza abaixo do que se tem encontrado como satisfatório em medidas feitas até o momento (da ordem de nanossegundo).

Aqui se abre uma explicação que tem origem no aparato experimental, que contou com um osciloscópio que projeta em sua tela a imagem gráfica de um sinal que é composto das médias de até 512 sinais mostrados na tela a uma taxa de amostragem de 2,5 GS/s, que representa $2,5 \times 10^6$ amostragens por segundo. Um osciloscópio com taxa de amostragem muito alta comumente dá como resultados gráficos sinais muito ruidosos e,

consequentemente, difíceis de serem analisados em tempo real. Por esta razão existem recursos gráficos, como a média, que de forma particular atenua o aspecto ruidoso do sinal gráfico, tornando a análise otimizada e melhorando a probabilidade de captura de um sinal com características mais próximas do real, já que qualquer oscilação atípica será compartilhada no grupo de médias selecionadas, reduzindo seu efeito nos dados obtidos. Este artifício, acessado como função direta do osciloscópio, foi utilizado, e nos resultados obtidos pela técnica da correlação cruzada, em carregamento de 40kN, gerando como resposta trinta tempos, onde muitos deles foram tomados com o mesmo valor, o que contribuiu para a diminuição do desvio-padrão.

Portanto, também nesta etapa é mantida a capacidade do sistema em fornecer medidas estáveis, precisas e, sobretudo confiáveis, tendo em vista as duas técnicas estudadas.



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D1 CC	F2 D1 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	7.4E-10	30	30
70%	8.3E-10	Média (s)	Média (s)
80%	9.4E-10	0,000044553	0.000044348
90%	1.1E-09	DP (s)	DP (s)
Varição da Carga (kN)	Varição da Temperatura (°C)		
45.385 - 45.312	20.0 - 20.5	2.4E-10	1.8E-09
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
2.04662E-07			

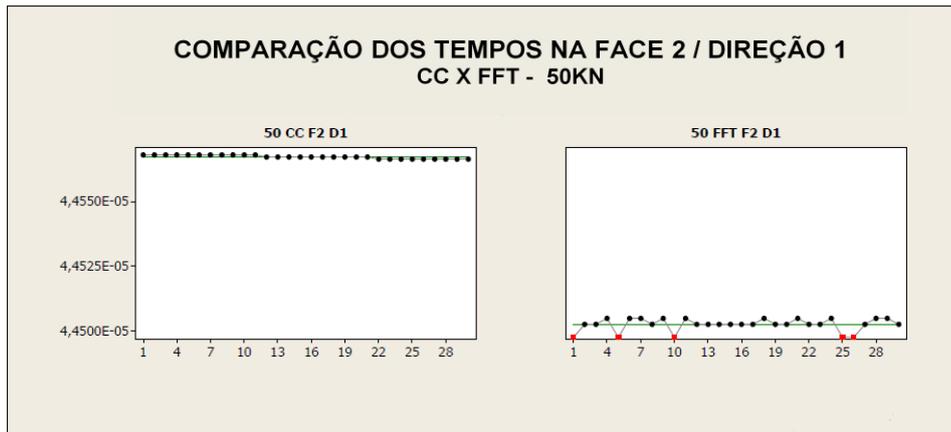
Figura 34: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 45 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	1.9E-09	30	30
70%	2.1E-09	Média (s)	Média (s)
80%	2.3E-09	0,000044778	0,000044432
90%	2.7E-09	DP (s)	DP (s)
Variação da Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)		
45.438 - 45.299	20.2 - 20.5	3.4E-09	3.0E-09
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
3.46352E-07			

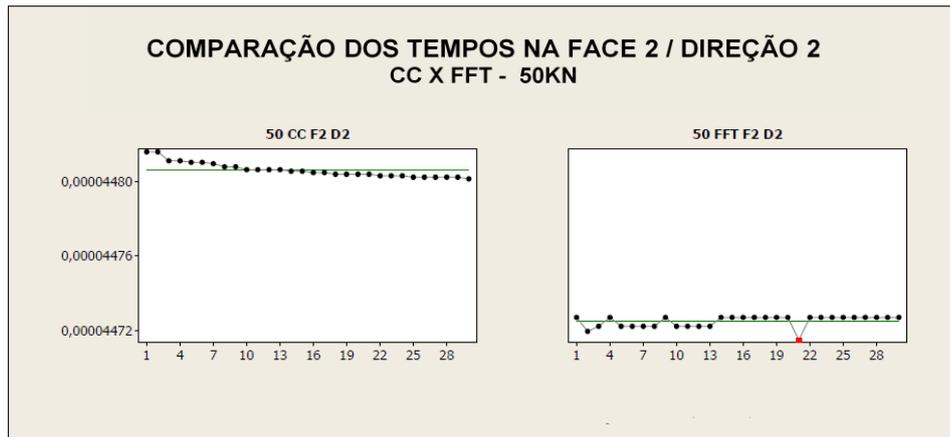
Figura 35: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 45 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)

Na etapa em que o carregamento foi de 45kN foi observado o mesmo fenômeno ocorrido na etapa com carregamento de 40kN, porém apenas na direção de polarização 1. Na direção de polarização 2, tanto estabilidade quanto poder do teste, foram satisfatórios, guardado o detalhe dos pontos excluídos pelo software.



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	1.1E-09	30	30
70%	1.2E-09	Média (s)	Média (s)
80%	1.4E-09	0,000044567	0,000044503
90%	1.6E-09	DP (s)	DP (s)
Variação da Carga (kN)	Variação da Temperatura (°C)	6.6E-10	2.5E-09
50.258 - 50.185	20.1 - 20.5	Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)	
6.47001E-08			

Figura 36: Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 1 - CC X FFT - Com carregamento 50 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	2.0E-09	30	30
70%	2.3E-09	Média (s)	Média (s)
80%	2.6E-09	0,000044806	0.000044725
90%	3.0E-09	DP (s)	DP (s)
Varição da Carga (KN)	Varição da Temperatura (°C)	3.9E-09	3.1E-09
50.397 - 50.369	20.1- 20.4	Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)	
8.12454E-08			

Figura 37 : Comparação dos tempos de percurso na face 2 / Direção 2 - CC X FFT - Com carregamento 50 kN (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)

Por fim, com carregamento de 50kN, houve medidas repetidas e com baixo desvio-padrão apenas na direção de polarização 1 pela técnica da correlação cruzada. Pela técnica da FFT houve também pontos excluídos automaticamente pelo software, porém sem prejuízo do poder do teste.

Em todos os casos analisados a estatística mostrou que as medidas de tempo tomadas pelas duas técnicas sempre foram diferentes entre si, variando, em média, de 64 a 421 nanossegundos. Em termos comparativos esta variação representa, quando ocorre a maior diferença, menos de 1% do tempo total de percurso da onda ultrassônica no bloco no eixo considerado. Além disso, temos ainda como resultado da abordagem estatística os valores dos desvios-padrão na ordem de nanossegundo ou menor, concordando com a resolução do osciloscópio empregado no experimento (300 MHz) e, principalmente, com o que já fora

concluído anteriormente em estudos de análise de tensões [23], que mostram que tensões aplicadas em materiais implicam em diferenças dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas da ordem de nanossegundo.

Outro aspecto relevante é o fato de que quando se analisa desvio-padrão em conjunto com poder do teste é possível compensar o descarte de pontos pelo software, sem prejuízo de uma análise consistente, como pôde ser visto na etapa de compressão com 50kN.

Tanto no primeiro quanto no segundo conjunto de dados (medidas feitas sem carregamento e com carregamento), foi possível, com o recurso estatístico computacional aplicado, obter resultados bastante interessantes acerca da capacidade do aparato experimental em realizar as medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas com as duas técnicas empregadas, o que mostrou a eficácia das duas técnicas medindo tempos de percurso de ondas ultrassônicas.

4.6 DISCUSSÃO SOBRE O COMPORTAMENTO FÍSICO DO BLOCO AO LONGO DO EXPERIMENTO

4.6.1 Comportamento da birrefringência acústica

Buscando apoio no conceito de birrefringência acústica explicado em 2.9 pôde ser avaliada a evolução desta propriedade física, que representa o grau de anisotropia de um material em decorrência da presença de tensão, à medida que é aplicado o carregamento mecânico.

As figuras (38) e (39) mostram o comportamento médio (levando-se em conta a tomada de trinta valores de tempo de percurso da onda ultrassônica cisalhante em cada uma das duas direções de polarização) da birrefringência acústica no material sem carregamento e também com as cinco cargas aplicadas. Estas duas figuras apresentam, respectivamente, os valores calculados de birrefringência com tempos tomados pelas técnicas da correlação cruzada e da FFT, onde pode ser notado o comportamento similar, mostrando a equivalência entre as técnicas. Nas duas figuras comentadas não houve qualquer ajuste matemático, apenas foram ligados os pontos dispersos com uma marcação suave das curvaturas.

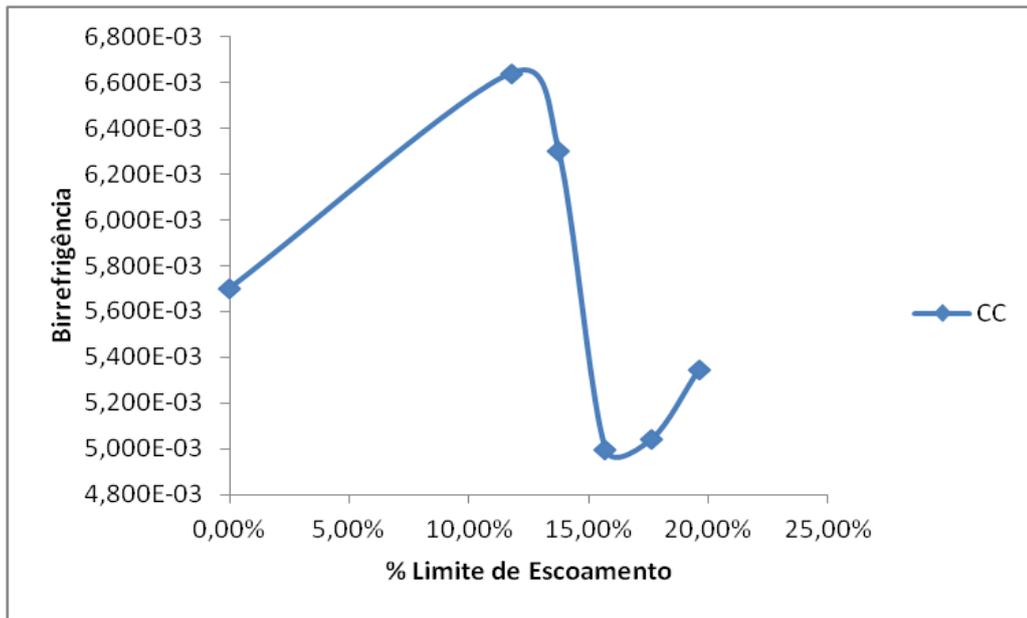


Figura 38: Comportamento da birrefringência acústica - método da correlação cruzada (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

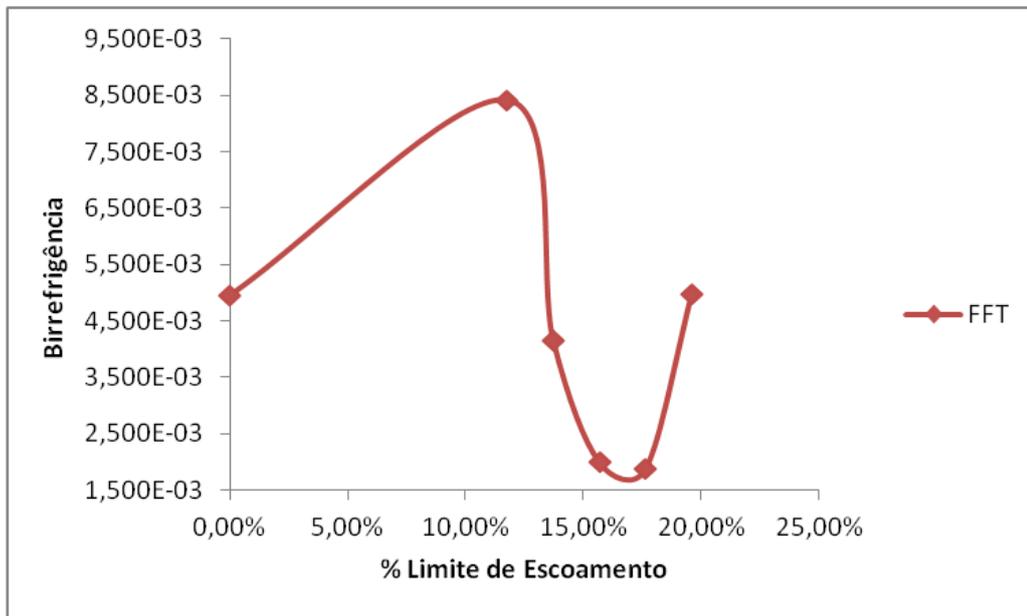


Figura 39: Comportamento da birrefringência acústica - método da FFT (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

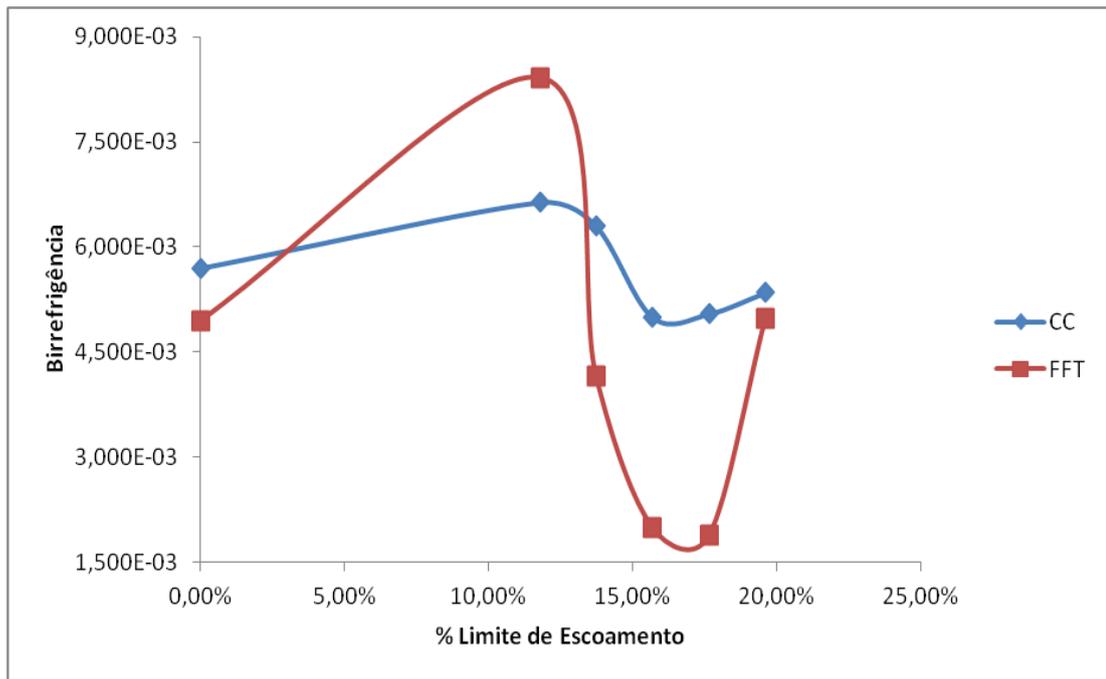


Figura 40: Comportamento da birrefringência acústica - método da correlação cruzada x método FFT (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)

Na figura (40) foi feita uma representação simultânea do comportamento mostrado nas figuras (38) e (39). A proporção entre as curvas, representadas agora em mesma escala, mostra que pela técnica da FFT a birrefringência tem maior amplitude gráfica, ou seja, sofre variações maiores à medida que aumenta o carregamento, sendo facilmente notado já que os pontos considerados para compor o gráfico são os mesmos. Esta característica permite inferir uma maior sensibilidade da técnica da FFT (quando avaliada em relação ao carregamento mecânico), quando comparada com a técnica da correlação cruzada.

Outra característica importante desta representação simultânea é a capacidade de ser notado o comportamento da birrefringência vista pelas duas técnicas. Na figura (40) fica claro o comportamento similar.

4.6.2 Variação dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas em função da carga aplicada

Também foi objeto de discussão a adequação de um modelo matemático decorrente do comportamento dos tempos médios (sempre obtidos através de 30 medidas) de percurso das ondas ultrassônicas, em função do carregamento aplicado, visto pelas duas técnicas em estudo. Os resultados possibilitaram bons ajustes, a começar pelo linear, observado na figura (41).

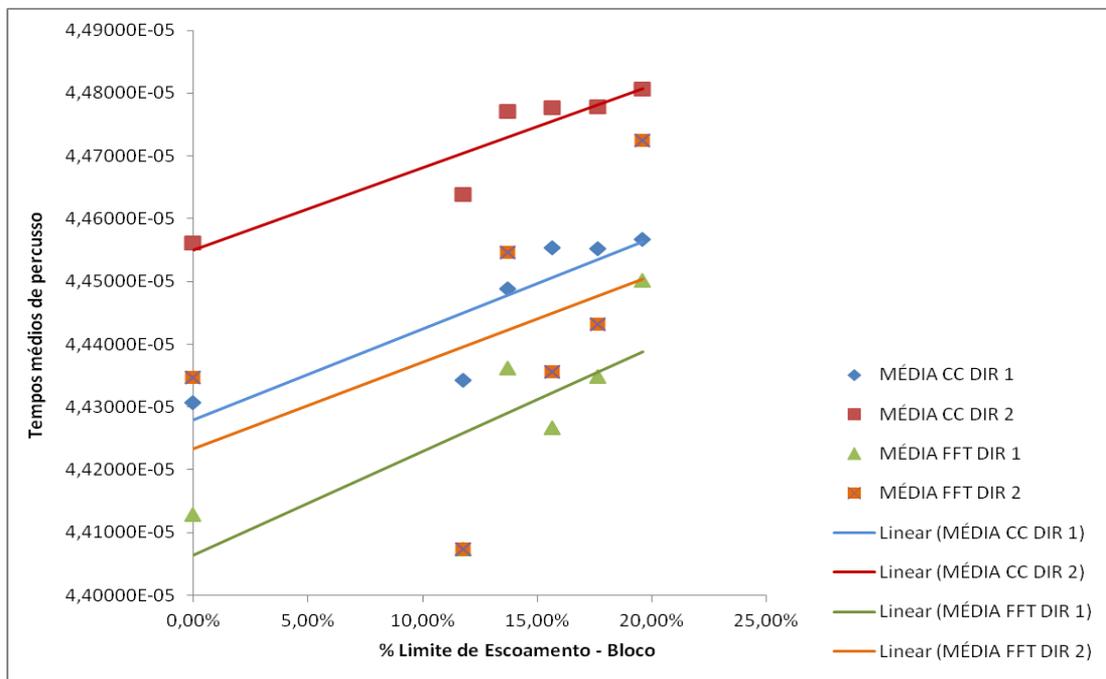


Figura 41 : Adequação de modelo : Análise dos tempos médios - Ajuste Linear (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)

O aspecto visual de paralelismo entre as retas ajustadas para o comportamento dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas diante das cargas aplicadas é também uma evidência de que ambas as técnicas são capazes de fazer medidas desses tempos.

Em virtude da dispersão desses pontos na representação gráfica para o ajuste linear, verificamos que os coeficientes de correlação destas retas (R^2) mostram pouca adequação destes conjuntos de pontos a uma função de primeiro grau, ainda que os valores de seus

coeficientes angulares concordem muito bem entre si, reforçando mais a evidência de que as duas técnicas são capazes de medir tempo de percurso de ondas ultrassônicas de modo bastante similar. Além de medirem bem os tempos de percurso, como provou a abordagem estatística, também são capazes de reproduzir um comportamento físico associado ao bloco de alumínio de maneira satisfatória.

Por conta do ajuste insatisfatório do coeficiente de correlação para função de primeiro grau buscou-se outros ajustes polinomiais, que foram explorados até o quarto grau, como se pode acompanhar nas figuras (42), (43), (44) e (45).

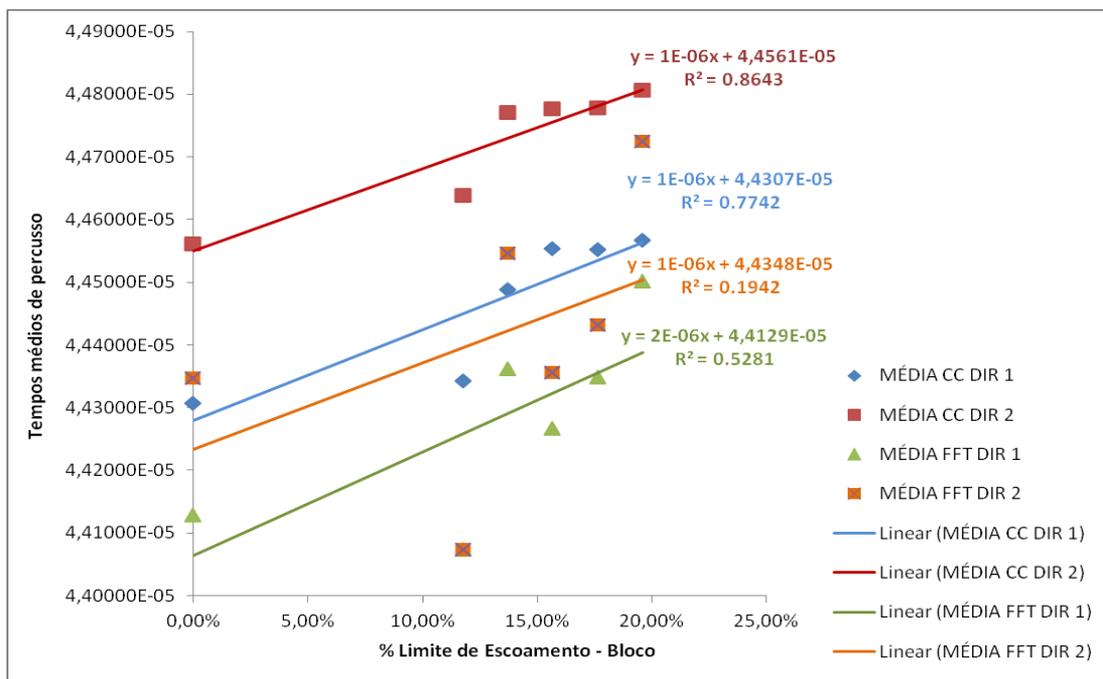


Figura 42: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste Linear, equações e coeficiente de correlação. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

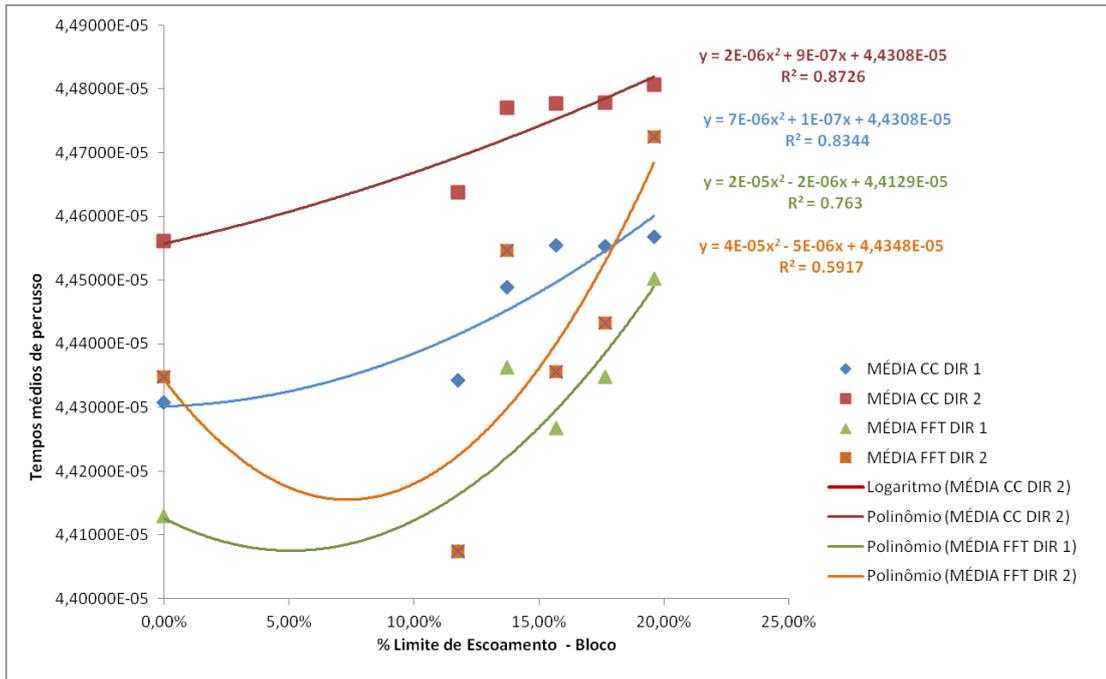


Figura 43: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste polinomial grau 2, equações e coeficiente de correlação. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

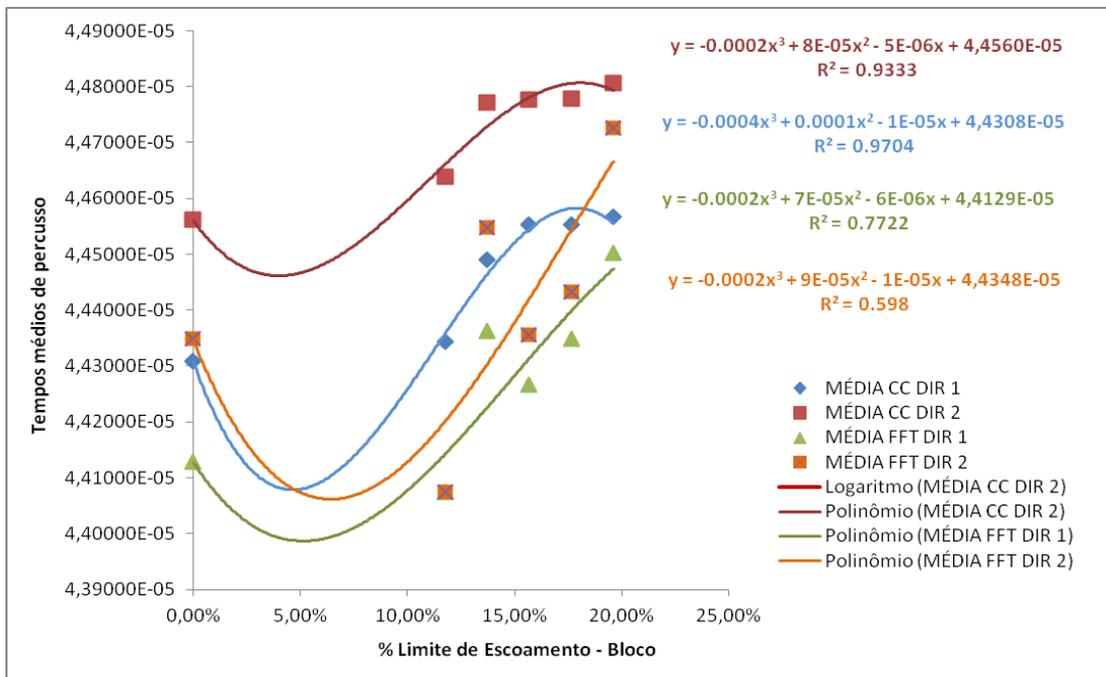


Figura 44: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste polinomial grau 3, equações e coeficiente de correlação. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

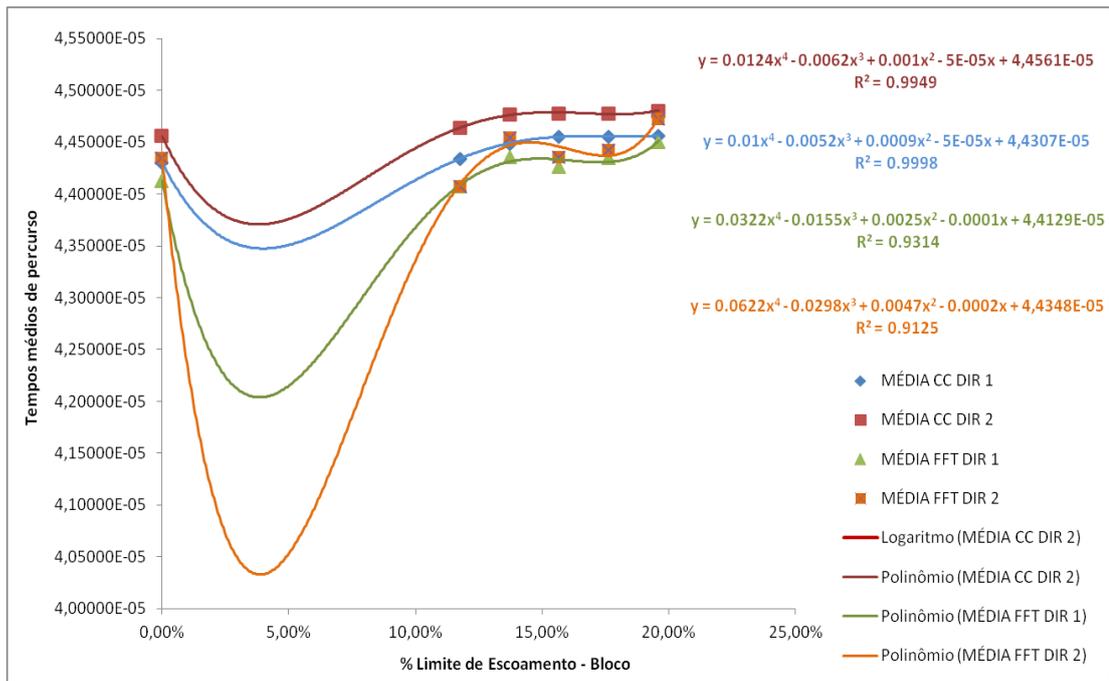


Figura 45: Adequação de modelo: Análise dos tempos médios - Ajuste polinomial grau 4 equações e coeficiente de correlação. (da SILVA NETO. Ramiro, 2014)

5 CONCLUSÕES

O experimento principal deste trabalho consistiu em examinar o comportamento de ondas ultrassônicas percorrendo um bloco feito de liga de alumínio 6351, onde foi registrada a evolução dos tempos de percurso à medida que cinco carregamentos estáticos de compressão foram impostos ao bloco em estudo.

A partir do objetivo deste trabalho, que foi o de comparar duas técnicas de medida de tempo de percurso de ondas ultrassônicas em material com características mecânicas conhecidas, puderam ser extraídas as seguintes conclusões do experimento principal:

a) do ponto de vista qualitativo, todos os resultados apresentados no capítulo 4 confirmaram a capacidade do aparato experimental em perceber, pela técnica da FFT, todas as mudanças nos tempos de percurso das ondas ultrassônicas inseridas no material;

b) a técnica da FFT pôde perceber as mudanças nos tempos de percurso das ondas ultrassônicas associadas aos baixos carregamentos, mostrando ser capaz de avaliar a presença de tensão no material;

c) avaliações quantitativas também mostraram que a técnica da FFT pôde ser usada no estudo de tensões no material escolhido;

d) a abordagem estatística também mostrou que a técnica da FFT apresentou as menores variações dos tempos quando comparadas com as medidas de tempo feitas pela técnica da correlação cruzada.

Embora os valores médios dos tempos que comparam as técnicas da correlação cruzada com a da FFT tenham sido sempre diferentes estatisticamente, essas diferenças não passaram de 1% (um por cento) do tempo total de percurso das ondas ultrassônicas no bloco, no eixo considerado;

e) Como consequência das boas medidas de tempo feitas pela técnica da FFT, foi possível avaliar graficamente a birrefringência acústica do bloco de alumínio no eixo considerado;

f) a técnica da FFT permitiu verificar comportamento físico do material do bloco similar ao visto pela técnica da correlação cruzada, mostrando maior sensibilidade da técnica da FFT em relação à técnica da correlação cruzada;

g) Uma verificação do comportamento dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas nas direções de polarização, medidos pelas duas técnicas em estudo, com o bloco sem carga e durante o carregamento também foi feita. Foram propostos quatro ajustes matemáticos para os comportamentos destes conjuntos de tempos (em média). O primeiro ajuste, linear (função de primeiro grau), forneceu bom aspecto geométrico, gerando retas onde três das quatro tinham mesmo coeficiente angular. No entanto o coeficiente de correlação destas retas não foi satisfatório, por conta da alta dispersão destes pontos ajustados para função linear. Na tentativa de conseguir um melhor retrato do comportamento do bloco na região considerada de seu regime elástico, outros três ajustes foram tentados (segundo grau, terceiro grau e quarto grau), onde em quarto grau houve bom ajuste para todos os coeficientes de correlação. Dessa forma pode-se concluir sem prejuízo da teoria acustoelástica que prevê comportamento linear da birrefringência acústica dentro do regime elástico, que em regime de baixo carregamento o comportamento do material estudado não é bem representado por ajuste linear;

h) as técnicas da correlação cruzada e da FFT foram capazes de fornecer valores das constantes elásticas de segunda ordem em concordância com os valores da literatura, o que reforça a validade da técnica da FFT em produzir medidas semelhantes às encontradas pela técnica da correlação cruzada; e

i) do ponto de vista experimental, o modelo físico se mostrou útil no cálculo das constantes elásticas, constituindo o aparato experimental um método não destrutivo para a aquisição destas propriedades. Dessa forma, o experimento adicional pode servir como auxiliar em trabalhos onde não seja possível adquirir um corpo de prova para levantamento das constantes elásticas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em decorrência dos resultados apontados por este trabalho, abrem-se algumas possibilidades para serem exploradas em trabalhos futuros. Tanto o aprimoramento dos experimentos deste trabalho, quanto a criação de novos estudos decorrentes dos resultados apresentados, são sugestões, a enumerar:

- a) Tendo em vista a dificuldade encontrada na técnica da correlação cruzada que é obrigatoriedade de trabalhar com sinais ultrassônicos que possuam pelo menos dois ecos distintos, sugere-se a aplicação da técnica da FFT em materiais de menores dimensões, por exemplo, chapas finas, em análise de tensões, com intuito de comprovar a sua melhor adequação quando houver dificuldade de geração de sinal ultrassônico que forneça pelo menos dois ecos plenamente distintos. E por conta de uma abordagem mais ampla, sugere-se o trabalho de avaliação de tensões com carregamento até valores próximos do limite de escoamento do material;
- b) Por conta de limitação da técnica da correlação cruzada trabalhar com sinais ultrassônicos que possuam pelo menos dois ecos distintos, sugere-se realizar a aplicação da técnica da FFT em materiais de alta atenuação do sinal ultrassônico, por exemplo, cerâmicos, com intuito de comprovar a melhor adequação da técnica da FFT quando houver dificuldade de geração de sinal ultrassônico nesse tipo de material;
- c) Dar continuidade ao estudo da teoria acustoelástica comparando as técnicas de medidas de tempo de ondas ultrassônicas da correlação cruzada e da FFT e buscar ajustes matemáticos que melhorem a percepção da birrefringência acústica em tensões muito abaixo do limite de escoamento do material em estudo, com intuito de verificar se a linearidade é mantida nesse regime; e
- d) Realização de estudo comparativo das técnicas ultrassônicas utilizando ensaios mecânicos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] International Nuclear Safety Center. INSC Material Properties Database. Disponível em <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Development/index.html> acessado em 22 de janeiro de 2014.

[2] Santin, Jorge Luiz. Ultrassom, Técnica e Aplicação. Petrobras, Curitiba, Paraná, 2003.

[3] Andreucci, Ricardo. Ensaio por Ultrassom, Aspectos Básicos. ABENDI, 3^a Edição, 2002.

[4] Bittencourt, Marcelo de Siqueira Queiroz. Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Tempo da Onda Ultrassônica e Análise do Estado de Tensões em Materiais Metálicos pela Técnica da Birrefringência Acústica. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

[5] Berutti, Felipe Amorim. Aplicação de Métodos De Ultrassom para Avaliação e Caracterização da Microestrutura de Materiais Cerâmicos à Base de Alumina e Sua Associação com Propriedades Mecânicas. UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2004.

[6] Penha, R. M. L. da. Análise de Sinais em Regime Transiente Aplicado à Técnica de WAVELET. IPEN, São Paulo, 1999.

[7] Smith, Steven W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Disponível em <http://www.dspguide.com/> acessado em 10 de janeiro de 2014.

[8] Processamento Digital de Sinal. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em http://paginas.fe.up.pt/~ajf/pds/aulas_teoricas.html acessado em 10 de janeiro de 2014.

[9] Joaquim, Marcelo B. Análise de Fourier. Departamento de Engenharia Elétrica, EESC, São Carlos, SP, 2003.

[10] Sistemas e Sinais. Departamento de Engenharia Elétrica, UFRGS.

- [11] Kogler, João. Série de Fourier e Transformada de Fourier. Disponível em <http://jkogler.wordpress.com/2008/06/23/serie-de-fourier-e-transformada-de-fourier-i/> acessado em 10 de janeiro de 2014.
- [12] Haykin, Simon. Sinais e Sistemas, tradução de José Carlos Barbosa dos Santos. Porto Alegre, Bookman, 2001.
- [13] Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Training Center. Nuclear Power Reactor Technology. Disponível em <http://www.kntc.re.kr/openlec/nuc/NPRT> acessado em 10 de janeiro de 2014.
- [14] Fonseca, Manoel Antonio da Costa. Avaliação Acustoelásticas de Tubo OCTG do Tipo Casing API 5CT Grau N80Q Soldados com Processo ERW/HFIW
- [15] http://pt.wikipedia.org/wiki/Compressão_física
- [16] Baroni, Douglas Brandão. “Desenvolvimento de técnica ultrassônica para medida de porosidade em pastilhas de UO_2 ”, *Mestrado Profissional* 2008.
- [17] Bittencourt, Marcelo de Siqueira Queiroz., Pinheiro, Marcos Aurélio de Andrade., Lamy, Carlos Alfredo., Filho, João da Cruz Payão, “Medida o tempo de percurso de onda ultrassônica para avaliação de tensões”, *PANNDT*, Rio de Janeiro, Junho 2003.
- [18] Xavier, Allan dos Santos, “Estudo de uma nova técnica de medida do tempo de percurso da onda ultrassônica usando o espectro de frequência”, *Mestrado Profissional* 2010.
- [19] Goebbels, K., “Materials Characterization for Process Control and Product Conformity”, CRC Press.
- [20] Callister Jr., William D. Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução.
- [21] <http://www.imperiosmetais.com.br/aluminio-6351-php>.

- [22] Do Carmo, Daniel Chauviere., Bittencourt, Marcelo De Siqueira Queiroz., Filho, João Da Cruz Payão, “Avaliação por ultrassom das tensões impostas por flexão em uma barra de aço”, *61º Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro, 24 a 27 julho de 2006,
- [23] Ortega, Lintos Patricio Carvajal., Lamy, Carlos Alfredo., Bittencourt, Marcelo De Siqueira Queiroz., Moraes, Marcelo Melo., Filho, João Cruz Payão, “Avaliação por ultrassom de tratamento térmico de alívio de tensões em componente industrial”, *Soldagem e Inspeção*, Volume. 10, n.1, Jan/Mar 2005.
- [24] Matos, Adriana Oliveira., Bittencourt, Marcelo De Siqueira Queiroz, Filho, Orlando João Agostinho Gonçalves, Filho, João Da Cruz Payão, “Avaliação de tensões internas por ultrassom usando a técnica da birrefringência acústica”, *INAC*, Santos, 2005.
- [25] Ortega, Lintos Patricio Carvajal., Lamy, Carlos Alfredo., Bittencourt, Marcelo De Siqueira Queiroz, Filho, João Cruz Payão., Gonçalves Filho, Orlando João Agostinho. “Introdução à Avaliação de Tensões por Ultrassom”, 1ª edição, 2011.
- [26] Tanala, E., Bourse, G., Fremiot, M., *et al*, “Determination of Near Surface Residual Stresses on Welded Joints Using Ultrasonic Methods”. *NDT & E International*, v 28, n. 2, pp. 83-88, Apr. 1995.
- [27] Hughes, D.S., Kelly, J.K., “Second Order Elastic Deformation of Solids”, *Physical Review*, v. 92, n. 5, pp. 1145-1149, Dec. 1953.
- [28] Nikitina, N.Y., Ostrovsky, L.A., “An Ultrasonic Method for Measuring Stresses in Engineering Materials”. *Ultrasonics*, v. 35, n. 8, pp.605-610, Jan. 1998.

ANEXO 01

Tabela 09: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 30kN

FACE II - 30 kN												
MÉTODO SEQUENCIAL												
DIREÇÃO 1						DIREÇÃO 2						BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	
1	20,1	50	1,13431E+06	2,26862E+04	4,40797E-05	1	20,0	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,24145E-03
2	20,1	50	1,13444E+06	2,26888E+04	4,40746E-05	2	20,0	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,35605E-03
3	20,2	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	3	19,9	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,30316E-03
4	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	4	20,0	50	1,12487E+06	2,24974E+04	4,44496E-05	8,41872E-03
5	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	5	19,9	50	1,12487E+06	2,24974E+04	4,44496E-05	8,41872E-03
6	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	6	19,9	50	1,12487E+06	2,24974E+04	4,44496E-05	8,41872E-03
7	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	7	20,1	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,35650E-03
8	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	8	20,1	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,35650E-03
9	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	9	20,1	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,35650E-03
10	20,1	50	1,13444E+06	2,26888E+04	4,40746E-05	10	19,9	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,35605E-03
11	20,1	50	1,13444E+06	2,26888E+04	4,40746E-05	11	20,0	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,35605E-03
12	20,1	50	1,13450E+06	2,26900E+04	4,40723E-05	12	20,0	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,46227E-03
13	20,1	50	1,13450E+06	2,26900E+04	4,40723E-05	13	20,0	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,40894E-03
14	20,0	50	1,13450E+06	2,26900E+04	4,40723E-05	14	20,0	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,40894E-03
15	20,0	50	1,13444E+06	2,26888E+04	4,40746E-05	15	20,0	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,35605E-03
16	20,0	50	1,13450E+06	2,26900E+04	4,40723E-05	16	19,9	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,40894E-03
17	20,0	50	1,13462E+06	2,26924E+04	4,40676E-05	17	20,0	50	1,12500E+06	2,25000E+04	4,44444E-05	8,51471E-03
18	20,0	50	1,13462E+06	2,26924E+04	4,40676E-05	18	20,0	50	1,12488E+06	2,24976E+04	4,44492E-05	8,62138E-03
19	20,0	50	1,13462E+06	2,26924E+04	4,40676E-05	19	20,0	50	1,12488E+06	2,24976E+04	4,44492E-05	8,62138E-03
20	20,0	50	1,13450E+06	2,26900E+04	4,40723E-05	20	20,0	50	1,12488E+06	2,24976E+04	4,44492E-05	8,51561E-03
21	20,0	50	1,13450E+06	2,26900E+04	4,40723E-05	21	20,0	50	1,12488E+06	2,24976E+04	4,44492E-05	8,51561E-03
22	20,1	50	1,13450E+06	2,26900E+04	4,40723E-05	22	20,0	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,46227E-03
23	20,1	50	1,13462E+06	2,26924E+04	4,40676E-05	23	19,9	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,56804E-03
24	20,1	50	1,13462E+06	2,26924E+04	4,40676E-05	24	19,9	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,56804E-03
25	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	25	20,0	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,35650E-03
26	20,1	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	26	20,0	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,35650E-03
27	20,0	50	1,13444E+06	2,26888E+04	4,40746E-05	27	20,0	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,40939E-03
28	20,0	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	28	19,9	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,35650E-03
29	20,0	50	1,13431E+06	2,26862E+04	4,40797E-05	29	20,0	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,29479E-03
30	20,0	50	1,13438E+06	2,26876E+04	4,40769E-05	30	20,1	50	1,12494E+06	2,24988E+04	4,44468E-05	8,35650E-03

Tabela 10: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 35kN

FACE II - 35 kN												
MÉTODO SEQUENCIAL												
DIREÇÃO 1						DIREÇÃO 2						BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCIOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCIOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	
1	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	1	20,0	53	1,18994E+06	2,2451698E+04	4,45401E-05	4,0340673E-03
2	20,1	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	2	20,0	53	1,18994E+06	2,2451698E+04	4,45401E-05	3,9838466E-03
3	20,2	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	3	19,9	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1435306E-03
4	20,1	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	4	20,0	53	1,18969E+06	2,2446981E+04	4,45494E-05	4,1939624E-03
5	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	5	19,9	53	1,18994E+06	2,2451698E+04	4,45401E-05	4,0340673E-03
6	20,1	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	6	19,9	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1435306E-03
7	20,1	53	1,19463E+06	2,2540189E+04	4,43652E-05	7	20,1	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,0933073E-03
8	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	8	20,1	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1937513E-03
9	20,1	53	1,19463E+06	2,2540189E+04	4,43652E-05	9	20,1	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,0933073E-03
10	20,1	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	10	19,9	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1435306E-03
11	20,1	53	1,19463E+06	2,2540189E+04	4,43652E-05	11	20,0	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,0933073E-03
12	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	12	20,0	53	1,18969E+06	2,2446981E+04	4,45494E-05	4,2441831E-03
13	20,1	53	1,19463E+06	2,2540189E+04	4,43652E-05	13	20,0	53	1,18962E+06	2,2445660E+04	4,45520E-05	4,2025794E-03
14	20,0	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	14	20,0	53	1,18962E+06	2,2445660E+04	4,45520E-05	4,2528027E-03
15	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	15	20,0	53	1,18969E+06	2,2446981E+04	4,45494E-05	4,2441831E-03
16	20,0	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	16	19,9	53	1,18994E+06	2,2451698E+04	4,45401E-05	3,9838466E-03
17	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	17	20,0	53	1,18994E+06	2,2451698E+04	4,45401E-05	4,0340673E-03
18	20,0	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	18	20,0	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1435306E-03
19	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	19	20,0	53	1,18969E+06	2,2446981E+04	4,45494E-05	4,2441831E-03
20	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	20	20,0	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1937513E-03
21	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	21	20,0	53	1,18994E+06	2,2451698E+04	4,45401E-05	4,0340673E-03
22	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	22	20,0	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1937513E-03
23	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	23	19,9	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1937513E-03
24	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	24	19,9	53	1,18969E+06	2,2446981E+04	4,45494E-05	4,2441831E-03
25	20,1	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	25	20,0	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1937513E-03
26	20,1	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	26	20,0	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1435306E-03
27	20,0	53	1,19469E+06	2,2541321E+04	4,43630E-05	27	20,0	53	1,18969E+06	2,2446981E+04	4,45494E-05	4,1939624E-03
28	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	28	19,9	53	1,18962E+06	2,2445660E+04	4,45520E-05	4,3030234E-03
29	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	29	20,0	53	1,18975E+06	2,2448113E+04	4,45472E-05	4,1937513E-03
30	20,0	53	1,19475E+06	2,2542453E+04	4,43607E-05	30	20,1	53	1,18969E+06	2,2446981E+04	4,45494E-05	4,2441831E-03

Tabela 11: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 40kN

FACE II - 40 kN												
MÉTODO SEQUENCIAL												
DIREÇÃO 1						DIREÇÃO 2						BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	
1	20,1	52	1,17475E+06	2,2591346E+04	4,42647E-05	1	20,0	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,09274E-03
2	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	2	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
3	20,2	52	1,17463E+06	2,2589038E+04	4,42693E-05	3	19,9	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	1,99059E-03
4	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	4	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
5	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	5	19,9	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,04167E-03
6	20,1	52	1,17475E+06	2,2591346E+04	4,42647E-05	6	19,9	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	2,04056E-03
7	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	7	20,1	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
8	20,1	52	1,17463E+06	2,2589038E+04	4,42693E-05	8	20,1	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	1,99059E-03
9	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	9	20,1	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
10	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	10	19,9	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,04167E-03
11	20,1	52	1,17475E+06	2,2591346E+04	4,42647E-05	11	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	2,04056E-03
12	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	12	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
13	20,1	52	1,17463E+06	2,2589038E+04	4,42693E-05	13	20,0	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	1,99059E-03
14	20,0	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	14	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
15	20,0	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	15	20,0	51	1,14988E+06	2,2546667E+04	4,43525E-05	1,92861E-03
16	20,0	52	1,17463E+06	2,2589038E+04	4,42693E-05	16	19,9	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	1,99059E-03
17	20,0	52	1,17463E+06	2,2589038E+04	4,42693E-05	17	20,0	51	1,14988E+06	2,2546667E+04	4,43525E-05	1,87753E-03
18	20,0	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	18	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
19	20,0	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	19	20,0	51	1,14988E+06	2,2546667E+04	4,43525E-05	1,92861E-03
20	20,0	52	1,17463E+06	2,2589038E+04	4,42693E-05	20	20,0	51	1,14988E+06	2,2546667E+04	4,43525E-05	1,87753E-03
21	20,0	52	1,17475E+06	2,2591346E+04	4,42647E-05	21	20,0	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,09274E-03
22	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	22	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
23	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	23	19,9	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,04167E-03
24	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	24	19,9	51	1,14988E+06	2,2546667E+04	4,43525E-05	1,92861E-03
25	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	25	20,0	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,04167E-03
26	20,1	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	26	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,98949E-03
27	20,0	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	27	20,0	51	1,14988E+06	2,2546667E+04	4,43525E-05	1,92861E-03
28	20,0	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	28	19,9	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,04167E-03
29	20,0	52	1,17463E+06	2,2589038E+04	4,42693E-05	29	20,0	51	1,14981E+06	2,2545294E+04	4,43552E-05	1,93841E-03
30	20,0	52	1,17469E+06	2,2590192E+04	4,42670E-05	30	20,1	51	1,14975E+06	2,2544118E+04	4,43575E-05	2,04167E-03

Tabela 12: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 45kN

FACE II - 45 kN												
MÉTODO SEQUENCIAL												
DIREÇÃO 1						DIREÇÃO 2						BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	
1	20,1	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	1	20,0	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
2	20,1	51	1,15006E+06	2,2550196E+04	4,43455E-05	2	20,0	52	1,17044E+06	2,2508462E+04	4,44277E-05	1,8524538E-03
3	20,2	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	3	19,9	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
4	20,1	51	1,15006E+06	2,2550196E+04	4,43455E-05	4	20,0	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,9122621E-03
5	20,1	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	5	19,9	52	1,17031E+06	2,2505962E+04	4,44327E-05	1,9113567E-03
6	20,1	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	6	19,9	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
7	20,1	51	1,15006E+06	2,2550196E+04	4,43455E-05	7	20,1	52	1,17044E+06	2,2508462E+04	4,44277E-05	1,8524538E-03
8	20,1	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	8	20,1	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
9	20,1	51	1,15006E+06	2,2550196E+04	4,43455E-05	9	20,1	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,9122621E-03
10	20,1	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	10	19,9	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
11	20,1	51	1,15006E+06	2,2550196E+04	4,43455E-05	11	20,0	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,9122621E-03
12	20,1	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	12	20,0	52	1,17044E+06	2,2508462E+04	4,44277E-05	1,8002813E-03
13	20,1	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	13	20,0	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
14	20,0	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	14	20,0	52	1,17031E+06	2,2505962E+04	4,44327E-05	1,9113567E-03
15	20,0	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	15	20,0	52	1,17031E+06	2,2505962E+04	4,44327E-05	1,8591814E-03
16	20,0	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	16	19,9	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
17	20,0	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	17	20,0	52	1,17044E+06	2,2508462E+04	4,44277E-05	1,8002813E-03
18	20,0	51	1,15006E+06	2,2550196E+04	4,43455E-05	18	20,0	52	1,17031E+06	2,2505962E+04	4,44327E-05	1,9635292E-03
19	20,0	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	19	20,0	52	1,17031E+06	2,2505962E+04	4,44327E-05	1,9113567E-03
20	20,0	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	20	20,0	52	1,17019E+06	2,2503654E+04	4,44372E-05	1,9617235E-03
21	20,0	51	1,15000E+06	2,2549020E+04	4,43478E-05	21	20,0	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8600896E-03
22	20,1	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	22	20,0	52	1,17044E+06	2,2508462E+04	4,44277E-05	1,7481060E-03
23	20,1	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	23	19,9	52	1,17019E+06	2,2503654E+04	4,44372E-05	1,9617235E-03
24	20,1	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	24	19,9	52	1,17019E+06	2,2503654E+04	4,44372E-05	1,9617235E-03
25	20,1	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	25	20,0	52	1,17019E+06	2,2503654E+04	4,44372E-05	1,9617235E-03
26	20,1	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	26	20,0	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8079143E-03
27	20,0	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	27	20,0	52	1,17019E+06	2,2503654E+04	4,44372E-05	1,9617235E-03
28	20,0	51	1,15006E+06	2,2550196E+04	4,43455E-05	28	19,9	52	1,17031E+06	2,2505962E+04	4,44327E-05	1,9635292E-03
29	20,0	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	29	20,0	52	1,17031E+06	2,2505962E+04	4,44327E-05	1,8591814E-03
30	20,0	51	1,14994E+06	2,2547843E+04	4,43501E-05	30	20,1	52	1,17037E+06	2,2507115E+04	4,44304E-05	1,8079143E-03

Tabela 13: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado - Face II /FFT/ 50 kN

FACE II - 50 kN												
MÉTODO SEQUENCIAL												
DIREÇÃO 1						DIREÇÃO 2						BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	SINAL	T (°C)	nº DE PICOS	DELTA f (OSCILOSCÓPIO)	DELTA f/nº DE PICOS	DELTA t	
1	20,1	51	1,14613E+06	2,2473137E+04	4,44976E-05	1	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,1435020E-03
2	20,1	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	2	20,0	51	1,14044E+06	2,2361569E+04	4,47196E-05	4,8634559E-03
3	20,2	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	3	19,9	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	4,9248372E-03
4	20,1	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	4	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	4,9777140E-03
5	20,1	51	1,14613E+06	2,2473137E+04	4,44976E-05	5	19,9	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	5,0382681E-03
6	20,1	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	6	19,9	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	4,8724801E-03
7	20,1	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	7	20,1	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	4,8724801E-03
8	20,1	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	8	20,1	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	4,9248372E-03
9	20,1	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	9	20,1	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	4,9777140E-03
10	20,1	51	1,14613E+06	2,2473137E+04	4,44976E-05	10	19,9	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	5,0382681E-03
11	20,1	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	11	20,0	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	4,8724801E-03
12	20,1	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	12	20,0	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	4,9248372E-03
13	20,1	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	13	20,0	51	1,14037E+06	2,2360196E+04	4,47223E-05	4,9248372E-03
14	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	14	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
15	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	15	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
16	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	16	19,9	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
17	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	17	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
18	20,0	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	18	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	4,9777140E-03
19	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	19	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
20	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	20	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
21	20,0	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	21	20,0	51	1,14056E+06	2,2363922E+04	4,47149E-05	4,7058824E-03
22	20,1	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	22	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
23	20,1	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	23	19,9	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
24	20,1	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	24	19,9	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	4,9777140E-03
25	20,1	51	1,14613E+06	2,2473137E+04	4,44976E-05	25	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,1435020E-03
26	20,1	51	1,14613E+06	2,2473137E+04	4,44976E-05	26	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,1435020E-03
27	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	27	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03
28	20,0	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	28	19,9	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	4,9777140E-03
29	20,0	51	1,14594E+06	2,2469412E+04	4,45049E-05	29	20,0	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	4,9777140E-03
30	20,0	51	1,14600E+06	2,2470588E+04	4,45026E-05	30	20,1	51	1,14025E+06	2,2357843E+04	4,47270E-05	5,0300711E-03

Tabela 14: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado

Face II /CC/ 30 kN

FACE II - 30 kN						
MÉTODO SEQUENCIAL						
SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 1	SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 2	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
1	20,0	4,43392E-05	1	19,6	4,46072E-05	6,026101E-03
2	20,0	4,43400E-05	2	19,7	4,46520E-05	7,011866E-03
3	19,9	4,43400E-05	3	19,7	4,46424E-05	6,796850E-03
4	19,9	4,43400E-05	4	19,6	4,46424E-05	6,796850E-03
5	19,9	4,43408E-05	5	19,7	4,46000E-05	5,828596E-03
6	19,9	4,43408E-05	6	19,6	4,45880E-05	5,559504E-03
7	20,0	4,43408E-05	7	19,6	4,46432E-05	6,796728E-03
8	20,0	4,43408E-05	8	19,6	4,46280E-05	6,456196E-03
9	20,0	4,43408E-05	9	19,6	4,46224E-05	6,330708E-03
10	20,0	4,43408E-05	10	19,6	4,46426E-05	6,783288E-03
11	20,0	4,43416E-05	11	19,9	4,46088E-05	6,007843E-03
12	20,0	4,43408E-05	12	19,9	4,46168E-05	6,205203E-03
13	20,0	4,43416E-05	13	19,9	4,46064E-05	5,954041E-03
14	20,0	4,43416E-05	14	19,9	4,45864E-05	5,505578E-03
15	20,1	4,43424E-05	15	19,9	4,45856E-05	5,469593E-03
16	20,1	4,43424E-05	16	19,9	4,45864E-05	5,487536E-03
17	20,1	4,43416E-05	17	19,9	4,46848E-05	7,710073E-03
18	20,1	4,43424E-05	18	19,9	4,45800E-05	5,343985E-03
19	20,1	4,43424E-05	19	19,9	4,45816E-05	5,379875E-03
20	20,2	4,43408E-05	20	19,9	4,45808E-05	5,398014E-03
21	20,2	4,43432E-05	21	19,9	4,48392E-05	1,112327E-02
22	20,2	4,43440E-05	22	19,9	4,48392E-05	1,110523E-02
23	20,2	4,43448E-05	23	19,9	4,48376E-05	1,105151E-02
24	20,3	4,43456E-05	24	20,0	4,48392E-05	1,106915E-02
25	20,2	4,43456E-05	25	20,0	4,45856E-05	5,397431E-03
26	20,1	4,43464E-05	26	20,1	4,45840E-05	5,343505E-03
27	20,0	4,43464E-05	27	20,1	4,45832E-05	5,325561E-03
28	19,9	4,43464E-05	28	20,1	4,45832E-05	5,325561E-03
29	20,0	4,43448E-05	29	20,1	4,45808E-05	5,307808E-03
30	20,0	4,43440E-05	30	20,1	4,45808E-05	5,325848E-03

Tabela 15: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado
Face II /CC/ 35 kN

FACE II - 35 kN						
MÉTODO SEQUENCIAL						
SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 1	SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 2	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
1	20,0	4,43184E-05	1	19,6	4,47640E-05	1,000422E-02
2	20,0	4,43176E-05	2	19,7	4,47640E-05	1,002227E-02
3	19,9	4,43176E-05	3	19,7	4,47640E-05	1,002227E-02
4	19,9	4,43176E-05	4	19,6	4,47640E-05	1,002227E-02
5	19,9	4,43176E-05	5	19,7	4,47640E-05	1,002227E-02
6	19,9	4,43176E-05	6	19,6	4,47656E-05	1,005801E-02
7	20,0	4,43176E-05	7	19,6	4,47680E-05	1,011162E-02
8	20,0	4,43176E-05	8	19,6	4,47688E-05	1,012949E-02
9	20,0	4,45520E-05	9	19,6	4,47696E-05	4,872282E-03
10	20,0	4,45520E-05	10	19,6	4,47704E-05	4,890151E-03
11	20,0	4,45520E-05	11	19,9	4,47704E-05	4,890151E-03
12	20,0	4,45520E-05	12	19,9	4,47712E-05	4,908019E-03
13	20,0	4,45520E-05	13	19,9	4,47712E-05	4,908019E-03
14	20,0	4,45520E-05	14	19,9	4,47712E-05	4,908019E-03
15	20,1	4,45520E-05	15	19,9	4,47712E-05	4,908019E-03
16	20,1	4,45512E-05	16	19,9	4,47720E-05	4,943844E-03
17	20,1	4,45512E-05	17	19,9	4,47720E-05	4,943844E-03
18	20,1	4,45512E-05	18	19,9	4,47720E-05	4,943844E-03
19	20,1	4,45512E-05	19	19,9	4,47720E-05	4,943844E-03
20	20,2	4,45512E-05	20	19,9	4,47728E-05	4,961712E-03
21	20,2	4,45512E-05	21	19,9	4,47728E-05	4,961712E-03
22	20,2	4,45512E-05	22	19,9	4,47728E-05	4,961712E-03
23	20,2	4,45512E-05	23	19,9	4,47728E-05	4,961712E-03
24	20,3	4,45512E-05	24	20,0	4,47728E-05	4,961712E-03
25	20,2	4,45512E-05	25	20,0	4,47728E-05	4,961712E-03
26	20,1	4,45512E-05	26	20,1	4,47736E-05	4,979580E-03
27	20,0	4,45512E-05	27	20,1	4,47736E-05	4,979580E-03
28	19,9	4,45512E-05	28	20,1	4,47736E-05	4,979580E-03
29	20,0	4,45512E-05	29	20,1	4,47736E-05	4,979580E-03
30	20,0	4,45512E-05	30	20,1	4,47736E-05	4,979580E-03

Tabela 16: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado
Face II /CC/ 40 kN

FACE II - 40 kN						
MÉTODO SEQUENCIAL						
SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 1	SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 2	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
1	20,0	4,45536E-05	1	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
2	20,0	4,45536E-05	2	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
3	19,9	4,45536E-05	3	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
4	19,9	4,45536E-05	4	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
5	19,9	4,45536E-05	5	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
6	19,9	4,45536E-05	6	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
7	20,0	4,45536E-05	7	20,3	4,47760E-05	4,979313E-03
8	20,0	4,45536E-05	8	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
9	20,0	4,45536E-05	9	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
10	20,0	4,45536E-05	10	19,6	4,47768E-05	4,997179E-03
11	20,0	4,45536E-05	11	19,9	4,47768E-05	4,997179E-03
12	20,0	4,45536E-05	12	19,9	4,47768E-05	4,997179E-03
13	20,0	4,45536E-05	13	19,9	4,47768E-05	4,997179E-03
14	20,0	4,45536E-05	14	19,9	4,47768E-05	4,997179E-03
15	20,1	4,45536E-05	15	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
16	20,1	4,45536E-05	16	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
17	20,1	4,45536E-05	17	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
18	20,1	4,45536E-05	18	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
19	20,1	4,45536E-05	19	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
20	20,2	4,45536E-05	20	20,3	4,47768E-05	4,997179E-03
21	20,2	4,45536E-05	21	19,9	4,47768E-05	4,997179E-03
22	20,2	4,45536E-05	22	19,9	4,47768E-05	4,997179E-03
23	20,2	4,45536E-05	23	19,9	4,47768E-05	4,997179E-03
24	20,3	4,45536E-05	24	20,0	4,47768E-05	4,997179E-03
25	20,2	4,45536E-05	25	20,0	4,47768E-05	4,997179E-03
26	20,1	4,45536E-05	26	20,1	4,47768E-05	4,997179E-03
27	20,0	4,45536E-05	27	20,1	4,47768E-05	4,997179E-03
28	19,9	4,45536E-05	28	20,1	4,47768E-05	4,997179E-03
29	20,0	4,45536E-05	29	20,1	4,47768E-05	4,997179E-03
30	20,0	4,45536E-05	30	20,1	4,47768E-05	4,997179E-03

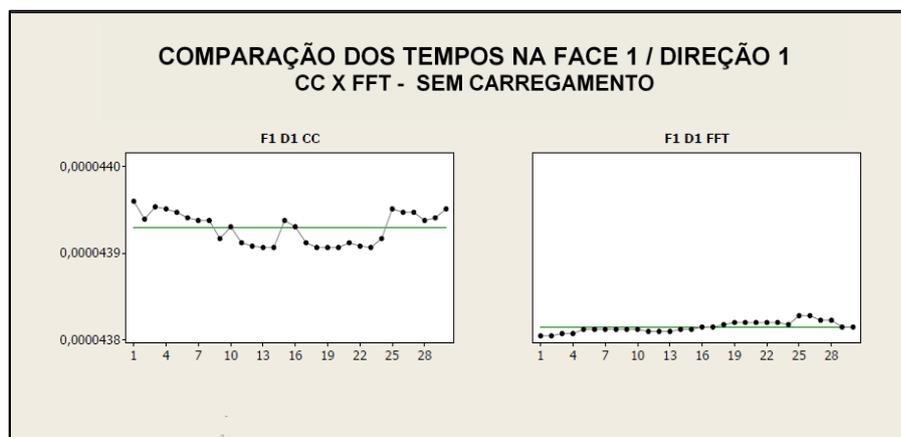
Tabela 17: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado
Face II /CC/ 45 kN

FACE II - 45 kN						
MÉTODO SEQUENCIAL						
SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 1	SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 2	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
1	20,0	4,45520E-05	1	19,6	4,47696E-05	4,872282E-03
2	20,0	4,45520E-05	2	19,7	4,47696E-05	4,872282E-03
3	19,9	4,45520E-05	3	19,7	4,47736E-05	4,961624E-03
4	19,9	4,45528E-05	4	19,6	4,47736E-05	4,943667E-03
5	19,9	4,45528E-05	5	19,7	4,47744E-05	4,961535E-03
6	19,9	4,45528E-05	6	19,6	4,47744E-05	4,961535E-03
7	20,0	4,45528E-05	7	19,6	4,47752E-05	4,979402E-03
8	20,0	4,45528E-05	8	19,6	4,47760E-05	4,997269E-03
9	20,0	4,45528E-05	9	19,6	4,47768E-05	5,015135E-03
10	20,0	4,45528E-05	10	19,6	4,47768E-05	5,015135E-03
11	20,0	4,45528E-05	11	19,9	4,47768E-05	5,015135E-03
12	20,0	4,45528E-05	12	19,9	4,47784E-05	5,050867E-03
13	20,0	4,45528E-05	13	19,9	4,47784E-05	5,050867E-03
14	20,0	4,45528E-05	14	19,9	4,47784E-05	5,050867E-03
15	20,1	4,45528E-05	15	19,9	4,47792E-05	5,068732E-03
16	20,1	4,45528E-05	16	19,9	4,47792E-05	5,068732E-03
17	20,1	4,45528E-05	17	19,9	4,47792E-05	5,068732E-03
18	20,1	4,45528E-05	18	19,9	4,47800E-05	5,086598E-03
19	20,1	4,45528E-05	19	19,9	4,47800E-05	5,086598E-03
20	20,2	4,45528E-05	20	19,9	4,47800E-05	5,086598E-03
21	20,2	4,45528E-05	21	19,9	4,47800E-05	5,086598E-03
22	20,2	4,45528E-05	22	19,9	4,47800E-05	5,086598E-03
23	20,2	4,45528E-05	23	19,9	4,47808E-05	5,104462E-03
24	20,3	4,45528E-05	24	20,0	4,47808E-05	5,104462E-03
25	20,2	4,45528E-05	25	20,0	4,47808E-05	5,104462E-03
26	20,1	4,45528E-05	26	20,1	4,47808E-05	5,104462E-03
27	20,0	4,45528E-05	27	20,1	4,47816E-05	5,122327E-03
28	19,9	4,45528E-05	28	20,1	4,47816E-05	5,122327E-03
29	20,0	4,45528E-05	29	20,1	4,47816E-05	5,122327E-03
30	20,0	4,45528E-05	30	20,1	4,47816E-05	5,122327E-03

Tabela 18: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas com o bloco carregado
Face II /CC/ 50 kN

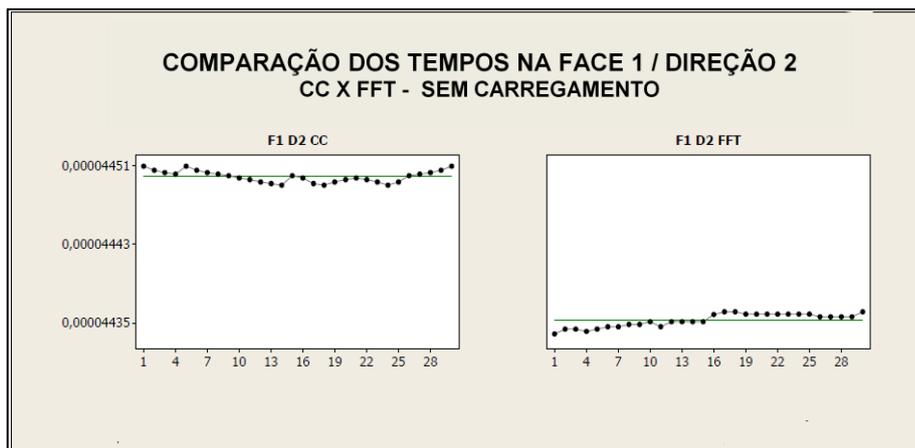
FACE II - 50 kN						
MÉTODO SEQUENCIAL						
SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 1	SINAL	T (°C)	DIREÇÃO 2	BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
1	20,0	4,45680E-05	1	20,2	4,48160E-05	5,549092E-03
2	20,0	4,45680E-05	2	20,2	4,48160E-05	5,549092E-03
3	19,9	4,45680E-05	3	20,2	4,48112E-05	5,441982E-03
4	19,9	4,45680E-05	4	20,2	4,48112E-05	5,441982E-03
5	19,9	4,45680E-05	5	20,2	4,48104E-05	5,424129E-03
6	19,9	4,45680E-05	6	20,2	4,48104E-05	5,424129E-03
7	20,0	4,45680E-05	7	20,2	4,48096E-05	5,406276E-03
8	20,0	4,45680E-05	8	20,2	4,48080E-05	5,370569E-03
9	20,0	4,45680E-05	9	20,2	4,48080E-05	5,370569E-03
10	20,0	4,45680E-05	10	20,1	4,48064E-05	5,334861E-03
11	20,0	4,45680E-05	11	20,1	4,48064E-05	5,334861E-03
12	20,0	4,45672E-05	12	20,1	4,48064E-05	5,352811E-03
13	20,0	4,45672E-05	13	20,1	4,48064E-05	5,352811E-03
14	20,0	4,45672E-05	14	20,1	4,48056E-05	5,334956E-03
15	20,1	4,45672E-05	15	20,1	4,48056E-05	5,334956E-03
16	20,1	4,45672E-05	16	20,1	4,48048E-05	5,317102E-03
17	20,1	4,45672E-05	17	20,1	4,48048E-05	5,317102E-03
18	20,1	4,45672E-05	18	20,1	4,48040E-05	5,299246E-03
19	20,1	4,45672E-05	19	20,1	4,48040E-05	5,299246E-03
20	20,2	4,45672E-05	20	19,9	4,48040E-05	5,299246E-03
21	20,2	4,45672E-05	21	19,9	4,48040E-05	5,299246E-03
22	20,2	4,45664E-05	22	19,9	4,48032E-05	5,299341E-03
23	20,2	4,45664E-05	23	19,9	4,48032E-05	5,299341E-03
24	20,3	4,45664E-05	24	20,0	4,48032E-05	5,299341E-03
25	20,2	4,45664E-05	25	20,0	4,48024E-05	5,281485E-03
26	20,1	4,45664E-05	26	20,1	4,48024E-05	5,281485E-03
27	20,0	4,45664E-05	27	20,1	4,48024E-05	5,281485E-03
28	19,9	4,45664E-05	28	20,1	4,48024E-05	5,281485E-03
29	20,0	4,45664E-05	29	20,1	4,48024E-05	5,281485E-03
30	20,0	4,45664E-05	30	20,1	4,48016E-05	5,263629E-03

ANEXO 02



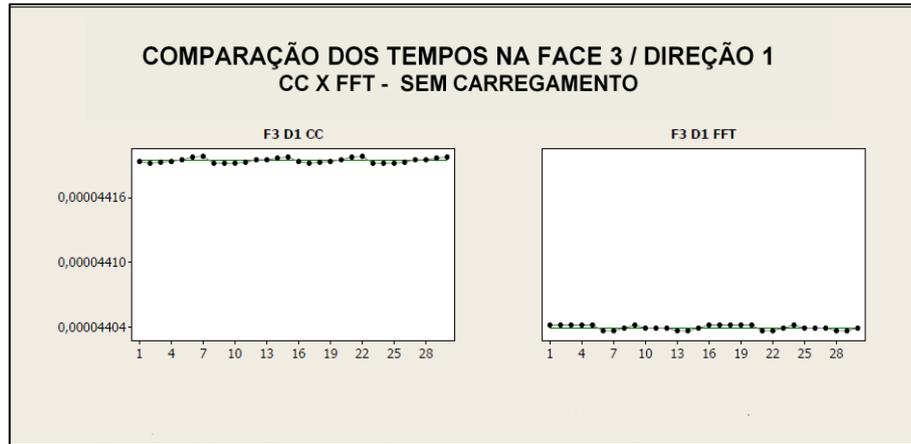
Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	8,1E-09	30	30
70%	9,0E-09	Média (s)	Média (s)
80%	1,0E-09	0,000043929	0,000043815
90%	1,2E-09	DP (s)	DP (s)
Varição da Carga (KN)	Varição da Temperatura (°C)		
	19,9-20,3	1,8E-08	6,1E-09
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
1,14114E-07			

Figura 46: Comparação dos tempos de percurso na face 1 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



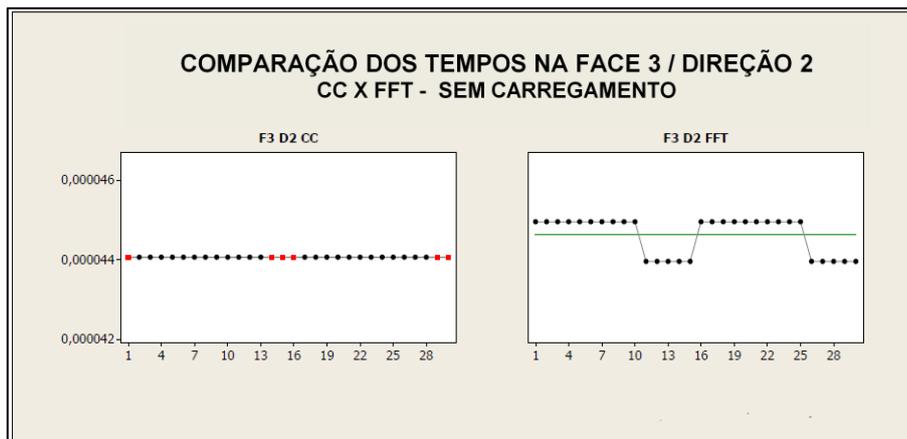
Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	3,7E-09	30	30
70%	4,1E-09	Média (s)	Média (s)
80%	4,7E-09	0,000044499	0,000044353
90%	5,4E-09	DP (s)	DP (s)
Varição da Carga (KN)	Varição da Temperatura (°C)		
	19,9-20,3	5,9E-09	6,7E-09
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
1,46050E-07			

Figura 47: Comparação dos tempos de percurso na face 1 / Direção 2 - CC X FFT - Sem Carregamento (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	1,3E-09	30	30
70%	1,4E-09	Média (s)	Média (s)
80%	1,7E-09	0,000044194	0,00004409
90%	1,9E-09	DP (s)	DP (s)
Varição da Carga (KN)	Varição da Temperatura (°C)		
	19,9-20,3	2,3E-09	2,2E-09
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
1,54847E-07			

Figura 48: Comparação dos tempos de percurso na face 3 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)



Poder do Teste	Menor Diferença	F2 D2 CC	F2 D2 FFT
		Nº de medidas	Nº de medidas
60%	2,0E-07	30	30
70%	2,2E-07	Média (s)	Média (s)
80%	2,5E-07	0,000044063	0,000044625
90%	2,9E-07	DP (s)	DP (s)
Varição da Carga (KN)	Varição da Temperatura (°C)		
	19,9-20,3	6,4E-10	4,8E-07
Diferença em 95% Intervalo de Confiança (s)			
-5,61860E-07			

Figura 49: Comparação dos tempos de percurso na face 3 / Direção 1 - CC X FFT - Sem Carregamento (da SILVA NETO.Ramiro, 2014)

